Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais

José Camapum de Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Eufrosina Terezinha Leão Carvalho
Organizadores

Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais

Série Geotecnia
Universidade de Brasília
Volume 4

Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais

Organizadores
José Camapum de Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Eufrosina Terezinha Leão Carvalho

Brasília 2012
Faculdade de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOTECNIA

Campus Universitário Darcy Ribeiro,
Edifício SG-12
Asa Norte – Brasília – DF – Brasil
CEP: 70910-900
Fone:+55 (61) 3307-0973
e-mail: geotec@unb.br
Site: www.geotecnia.unb.br

EQUIPE EDITORIAL

Capa
Alberto Crispim Gonçalves
José Camapum de Carvalho

Revisão
Cristiane Fuzer

Editoração Eletrônica
Fernando Manoel das Neves

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. É proibida a reprodução parcial ou integral deste livro, por qualquer meio ou processo, sem prévia autorização do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. A violação dos direitos autorais é punível como crime.

T674 Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais / José Camapum de Carvalho, Gilson de Farias Neves Gitirana Junior, Eufrosina Terezinha Leão Carvalho, organizadores. – Brasília : Faculdade de Tecnologia, 2012.
XXXVI, 644 p. : il. ; 155mm x 225mm. (Série Geotecnia – UnB, v. 4).

ISBN 978-85-60313-41-9

1. Infiltração. 2. Águas pluviais. 3. Solos tropicais. 4. Sistemas de infiltração. 5. Riscos da infiltração. I. Camapum de Carvalho, José. II. Gitirana Jr., Gilson de Farias Neves. III. Leão Carvalho, Eufrosina Terezinha. IV. Série Geotecnia – UnB.

CDU 624.131.64

PROJETO PRONEX

"Estruturas de infiltração da água da chuva como meio de prevenção de inundações e erosões"

Coordenação
José Camapum de Carvalho

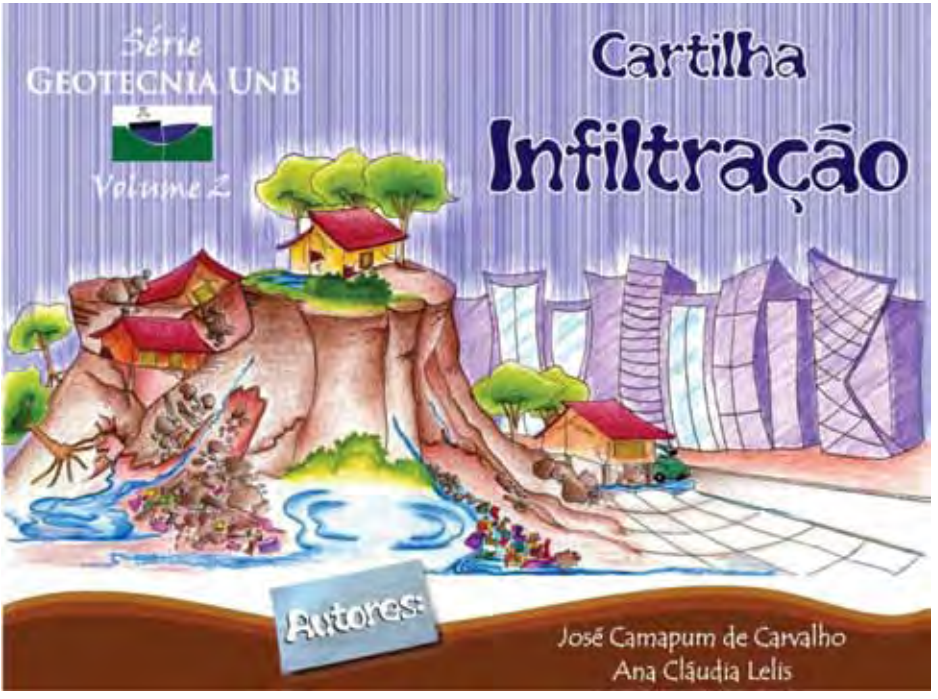
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – UnB

Financiamento
Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal – FAP/DF
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq

Instituições componentes
Universidade de Brasília (UnB) – Executora
Universidade Federal de Goiás (UFG) – Participante

Apoio
Instituto Geotécnico de Reabilitação do Sistema Encosta – Planície – REAGEO
(INCT CNPq/FAPERJ)

Cartilhas publicadas no âmbito do Projeto PRONEX



Dissertações de mestrado, teses de doutorado e relatórios de pós-doutorado desenvolvidos no âmbito da linha de pesquisa "Infiltração de águas pluviais"

Dissertações de mestrado

ALEXANDRE GARCES DE ARAÚJO. Análise do desempenho de poços de infiltração na cidade de Goiânia-Go. Goiânia: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. Orientador: Gilson de Farias Neves Gitirana Junior. Coorientador: Maurício Martines Sales. 2010.

EUFROSINA TEREZINHA LEÃO CARVALHO. Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na Zona Norte de Goiânia. Goiânia: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. Orientador: Maurício Martines Sales. Coorientador: Gilson de Farias Neves Gitirana Junior. 2008.

JOSELEIDE PEREIRA DA SILVA. Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum de Carvalho. 2007.

JULIANA MARIA SERNA RESTREPO. Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum de Carvalho. Coorientador: Manoel Porfírio Cordão Neto. 2010.

MATEO ARENAS RÍOS. Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: Newton Moreira de Souza. 2012.

Teses de doutorado

ANDRELISA SANTOS DE JESUS. Processos erosivos em Anápolis (Go): diagnóstico, medidas mitigadoras e prevenção. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum de Carvalho. Previsão de defesa 2012.

EUFROSINA TEREZINHA LEÃO CARVALHO. Avaliação geotécnica de poços de infiltração de águas pluviais implantados em diferentes solos de Goiânia, Goiás. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum de Carvalho. Coorientador: Gilson de Farias Neves Gitirana Junior. Previsão de defesa 2012.

GISLAINE CRISTINA LUÍZ. Influência na relação solo/atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso-Município de Goiânia/GO. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: Luis Fernando Ribeiro Martins. Coorientador: José Camapum de Carvalho. 2012.

JOSELEIDE PEREIRA DA SILVA. Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum de Carvalho. 2012.

YAMILE GONZÁLEZ VALENCIA. Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum de Carvalho. 2009.

Relatório de pós-doutorado

CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO. Infiltração da água de chuva como meio de prevenção de inundações e erosões. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Supervisor: José Camapum de Carvalho. 2008.

RAUL DARIO DURAND FARFAN. Análise numérica dos processos de infiltração e erosão. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Supervisores: José Camapum de Carvalho; Márcio Muniz de Farias. 2010.

WAGNER SANTOS DE ALMEIDA. Diagnóstico da vulnerabilidade a processos erosivos no entorno do Reservatório UHE Corumbá IV. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Supervisores: José Camapum de Carvalho; Newton Moreira de Souza. 2008.

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ. Estudo da melhoria de um solo tropical a partir de técnicas biotecnológicas utilizadas em campo. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Supervisor: José Camapum de Carvalho. 2010.

Prefácio

As consequências das mudanças climáticas esperadas para as próximas décadas se constituem em grandes desafios a serem enfrentados pelas sociedades em todas as partes do mundo. Novas obras de engenharia não poderão deixar de considerar tais mudanças e, certamente, adequações de grande parte das obras existentes, planejamento de cidades e mudanças de comportamento social serão necessárias nas próximas décadas. Eventos extremos, associados ou não a mudanças climáticas, em conjunto com crescimento acelerado de cidades, técnicas construtivas impróprias ou não sustentáveis e falta de planejamento do uso do solo já vêm provocando problemas em grande parte do país há vários anos. Esse é, por exemplo, o caso das enchentes em períodos chuvosos e suas consequências. A impermeabilização da superfície do terreno provoca excesso e concentração de fluxo d'água superficial ao longo de ruas, canais, rios e vales. As consequências têm sido frequentemente mostradas em veículos de comunicação: inundações, deslizamentos de encostas, danos ao meio ambiente (erosões, assoreamento de mananciais, por exemplo), perdas materiais consideráveis, numerosos cidadãos desabrigados e, pior, perdas de vidas humanas. A forma mais econômica de tratar esse tipo de problema é na sua raiz, ou seja, favorecer a infiltração da água da chuva. Parece trivial, mas pouco tem sido feito em relação a isso no Brasil. Antes pelo contrário, mais e mais extensões de solo têm sido impermeabilizadas, principalmente pela acelerada urbanização.

Nesse contexto, este livro traz grande contribuição para a redução de grande parte dos problemas causados por enchentes, por meio do favorecimento da infiltração da água da chuva no terreno. Ao longo dos seus 32 capítulos, pesquisadores, estudantes e profissionais de renome, de variadas formações e áreas de atuação, apresentam suas experiências sobre formas de aumentar a infiltração da água da chuva de modo a evitar ou minimizar os problemas descritos acima. Várias situações práticas para favorecer a infiltração de água no terreno são abordadas, incluindo métodos de previsão de riscos, métodos de dimensionamento, soluções de engenharia sustentáveis, simulações numéricas e uso de materiais modernos e de materiais de construção alternativos. Muitas destas contribuições são resultados de pesquisas de muitos anos, que vêm sendo conduzidas em centros de excelência no país. Temas bastante variados são abordados, desde a influência da infiltração em pavimentos,

estabilidade de encostas, técnicas de modelagem do problema até aspectos legais relevantes. Como não poderia deixar de ser, o problema deve ser abordado de forma multidisciplinar, e a presente publicação cumpre plenamente esse requisito. Não há dúvidas de que este livro fornece um importantíssimo acervo de resultados, discussões e técnicas que muito podem contribuir para a solução de gravíssimos e recorrentes problemas nacionais associados à falta de atenção à infiltração de águas pluviais. Estamos certos de que leitores de diversas áreas envolvidas com estas questões se beneficiarão muito com ele.

Brasília, Julho de 2012.

Reinhardt Adolfo Fuck
Ennio Marques Palmeira

Apresentação

Não haveria como apresentar este livro sem antes mencionar o projeto de pesquisa que lhe deu origem e de uma das filosofias de trabalho que têm sido adotadas pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás: a de buscar realizar projetos de pesquisa voltados para as necessidades socioambientais e tecnológicas regionais, nacionais e globais. Outra diretriz dos programas tem sido a de não só divulgar os resultados dessas pesquisas por meio de relatórios e de artigos publicados em eventos técnico-científicos e em periódicos, como também buscar transferi-los para a sociedade por meio de cartilhas e livros. Assim se procedeu no desenvolvimento do projeto de pesquisa PRONEX, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), *Prevenção e recuperação de áreas potenciais de degradação por processo de erosão superficial, profunda e interna no Centro-Oeste*, a partir do qual foram publicados, além de artigos, dissertações e teses, as cartilhas "Erosão" e "Meio Ambiente: Erosão" e o livro "Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro". No âmbito do projeto de pesquisa *Estruturas de infiltração da água da chuva como meio de prevenção de inundações e erosões*, financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) e pelo CNPq, que se encerra com a publicação deste livro, foram publicadas as cartilhas "Infiltração" e "Meio Ambiente: Infiltração". Nessa filosofia de trabalho, busca-se facilitar o acesso da sociedade aos conhecimentos gerados e aos avanços em direção ao desenvolvimento sustentável, nunca desprezando o uso de linguagens acessíveis aos diferentes níveis etários e de formação educacional. Entende-se que essa filosofia de trabalho pode contribuir para ampliar o retorno para a sociedade resultante dos investimentos em pesquisa.

Os tópicos tratados ao longo deste livro mostram que vários dos problemas socioambientais hoje existentes requerem, para solucioná-los, avaliações mais amplas sobre as práticas humanas, sobre a ocupação e uso do solo, sobre os níveis de poluição atmosférica do solo e da água. Não basta desenvolver soluções de engenharia; faz-se necessário construir e consolidar uma consciência social voltada para desenvolvimento ambientalmente sustentável e elaborar planos diretores e normas de ocupação e uso do solo que permitam a preservação do equilíbrio ambiental. O caminho para a construção dessa consciência é a educação ambiental formal e a não formal ou informal. Elas têm previsão legal no âmbito de várias Leis, sendo a mais específica a Lei nº 9.795 de 27 de abril de 1999, que dispõe sobre a educação ambiental, institui

a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Um olhar atento para os objetivos definidos no artigo 5º da Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), permite verificar que as soluções buscadas só se consolidarão por meio da conscientização e educação da sociedade. Essa educação tem um significado muito mais amplo e fundamental do que os simples avanços nos níveis e títulos acadêmicos, cabendo lembrar que não é necessário o título de doutor para que o cidadão seja ambientalmente educado e nem o título de doutor confere-lhe necessariamente consciência e sabedoria suficientes sobre as questões socioambientais.

Dentro desse espírito colocado, deu-se o desenvolvimento do projeto de pesquisa e chegou-se à elaboração deste livro. A sua capa, criada a partir de um quadro em bico de pena do artista Alberto Crispim Gonçalves, aponta para a tristeza diante dos problemas ambientais ligados à impermeabilização do solo e faz surgir, por meio de soluções tratadas neste livro, a esperança de se promover o desenvolvimento sustentável. O corpo do livro contempla tópicos relativos a técnicas numéricas e experimentais e aspectos teóricos e práticos. Aborda o tema infiltração de águas pluviais considerando aspectos como clima e interação solo-atmosfera, qualidade da água, forma do relevo, geologia, cobertura da superfície do solo, perfil de intemperismo, queimadas e manejo em áreas agrícolas no cerrado, sistemas de infiltração considerando-se as principais formas geométricas, comportamento do solo frente à infiltração, utilização de materiais geossintéticos, aplicação de cartografia geotécnica, riscos como os de rupturas de encostas, subsidências, comprometimento de construções e de erosões. Para ilustrar a complexidade do tema infiltração, destaca-se que, no fenômeno erosivo, tanto a deficiência de infiltração como a sua imposição em condições inapropriadas podem dar origem a processos erosivos em suas mais diferentes formas.

Os tópicos tratados extrapolam o conteúdo específico do projeto de pesquisa no qual este livro se insere. Também os pesquisadores, estudantes e profissionais nele envolvidos não são em sua totalidade integrantes do projeto de pesquisa. Mas não se busca aqui, nem se buscou ao longo do livro, estabelecer limites formais que correspondessem ao projeto de pesquisa em si, pois o objetivo maior de todos os envolvidos no projeto de pesquisa e na elaboração do livro foi o de contribuir para o desenvolvimento sustentável, disponibilizando para a comunidade técnico-científica, para a administração pública, para empresas públicas e privadas e para a sociedade como um todo material rico em informações técnicas, abundante em alternativas de soluções de engenharia para problemas socioambientais como erosões, inundações e rupturas de encostas.

Nesta oportunidade, agradecemos à FAP/DF, ao CNPq, à Universidade de Brasília, à Universidade Federal de Goiás e ao Instituto Geotécnico de Reabilitação do Sistema Encosta – Planície (REAGEO) a confiança e o apoio dado ao desenvolvimento do projeto. Agradecemos aos colegas e alunos o empenho no desenvolvimento do projeto e na elaboração deste livro, destacando que todos trouxeram grandes ensinamentos e muito nos honraram pelo brilhantismo e compartilhamento irrestrito de seus conhecimentos e experiências.

José Camapum de Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Eufrosina Terezinha Leão Carvalho

Autores do Livro

Alberto Crispim Gonçalves Advogado, Artista, Músico. Profissional liberal.
Autoria: Capa.

Alexandre Garcês de Araújo Engenheiro Civil, MSc. Professor da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Engenheiro da Agência Municipal de Obras de Goiânia.
Autoria: Capítulo 20.

Ana Carolina Seibt Engenheira Ambiental da SEMARH (Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Goiás).
Autoria: Capítulo 6.

André Luís Brasil Cavalcante Engenheiro Civil, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 13.

André Pacheco de Assis Engenheiro Civil, PhD. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 22.

Andrelisa Santos de Jesus Geógrafa, MSc. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Professora do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulos 4 e 10.

Breno Breseghelo do Nascimento Engenheiro Civil. Engenheiro da Geoserv (Serviços de Geotecnia e Construções LTDA).
Autoria: Capítulo 14.

Carlos Alberto Lauro Vargas Engenheiro Civil, DSc. Professor da Escola de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 23.

Carlos Rezende Cardoso Júnior Engenheiro Civil, MSc. Professor da Universidade Federal de Sergipe.
Autoria: Capítulo 24.

Carmen Regina Mendes de Araújo Correia Engenheira Agrônoma, DSc. Pesquisadora e Diretora Administrativa CRAD (Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas) da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 11.

Christopher William Fagg Botânico, DSc. Pesquisador do CRAD (Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas) da Universidade de Brasília, Professor do Programa de Pós-Graduação em Botânica e do Departamento de Farmácia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 11.

Cláudia Marcia Coutinho Gurjão Engenheira Civil, DSc. Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 17.

Claudia Valéria de Lima Geóloga, DSc. Professora do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 4.

Danielle Fernanda Morais de Melo Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Autoria: Capítulo 24.

Eduarda de Queiroz Motta Engenheira Civil, DSc. Engenheira Civil da Companhia Estadual de Habitação e Obras do Estado de Pernambuco.
Autoria: Capítulo 27.

Elza Conrado Jacintho Engenheira Civil, DSc. Servidora do Ministério Público Federal – Procuradoria Geral da República.
Autoria: Capítulo 7.

Ennio Marques Palmeira Engenheiro Civil, PhD. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Prefácio e Capítulos 16 e 18.

Eufrosina Terezinha Leão Carvalho Engenheira Civil, MSc. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Apresentação e Capítulos 14, 19, 20 e 32.

Fabrício Bueno da Fonseca Cardoso Geólogo, DSc. Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas.
Autoria: Capítulo 7.

Gilson de Farias Neves Gitirana Junior Engenheiro Civil, PhD. Professor da Escola de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Apresentação e Capítulos 9, 12, 14, 19, 20 e 32.

Gislaine Cristina Luiz Geógrafa, DSc. Professora do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulos 2 e 3

Gregório Luis Silva Araújo Engenheiro Civil, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 16.

Herculano Carlos de Mendonça Neto Arquiteto Urbanista e Engenheiro Civil. Engenheiro Civil da Caixa Econômica Federal.
Autoria: Capítulo 27.

Hernan Eduardo Martinez Carvajal Engenheiro Geólogo, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e Coordenador e Professor do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulos 5 e 22.

Jamily Quental Cruz Engenheira Civil, MSc. Técnica Industrial da Companhia Hidroelétrica do São Francisco.
Autoria: Capítulo 23.

Janaína Teixeira Camapum de Carvalho Advogada, Administradora. Profissional liberal.
Autoria: Capítulo 1.

Jorge Esteban Alarcón Guerrero Engenheiro Civil, MSc. Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 22.

Jorge Tadeu Abrão Engenheiro Civil. Diretor Técnico da Trípoli Engenharia – Empreendimentos e Construção Ltda.
Autoria: Capítulo 19.

José Camapum de Carvalho Engenheiro Civil, Administrador, Advogado, Dr. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capa, Apresentação e Capítulos 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 19, 28, 30, 31 e 32.

Joseleide Pereira da Silva Engenheira Civil, DSc. Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília.
Autorias: Capítulos 12, 17 e 18.

Juliana Serna Restrepo Engenheira Civil, MSc. Engenheira da Empresa Geottec Engenharia S/S.
Autoria: Capítulo 12.

Klebber Teodomiro Martins Formiga Engenheiro Civil, DSc. Professor da Escola de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 6.

Lenora Nunes Ludolf Gomes Bióloga, DSc. Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 8.

Lilian Riberio de Rezende Engenheira Civil, DSc. Professora da Escola de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 31.

Luan Carlos de Sena Monteiro Ozelim Aluno do Curso de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 13.

Luis Edmundo Prado de Campos Engenheiro Civil, MSc. Diretor da Escola Politécnica e Professor do Curso de Engenharia Civil e do Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Universidade Federal da Bahia.
Autoria: Capítulo 23.

Luis Fernando Ribeiro Martins Engenheiro Civil, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 3.

Manoel Porfírio Cordão Neto Engenheiro Civil, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 14.

Márcia Dieguez Leuzinger Bacharel em Direito, DSc. Procuradora do Estado do Paraná, Professora dos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Direito do Centro Universitário de Brasília.
Autoria: Capítulo 1.

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha Engenheira Civil, DSc. Professora da Escola de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 9.

Márcio Muniz de Farias Engenheiro Civil, PhD. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulos 15 e 31.

Marcos Massao Futai Engenheiro Civil, DSc. Professor dos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Autoria: Capítulos 24, 25 e 26.

Maria Cristina de Oliveira Bióloga, DSc. Pesquisadora do CRAD (Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas) da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 11.

Maria das Graças Gardoni Almeida Engenheira Civil, DSc. Professora da Universidade Federal de Minas Gerais.
Autoria: Capítulo 16.

Mariana Ramos Chrusciak Engenheira Civil, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 17.

Marianna Jacominy de Amorim Mendes Engenheira Civil, DSc. Pesquisadora no IRSTEA (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement), França.
Autoria: Capítulo 10.

Mateo Arenas Ríos Engenheiro Civil, MSc. Engenheiro Geotécnico da Empresa Geoblast S.A.
Autoria: Capítulo 21.

Maurício Martines Sales Engenheiro Civil, DSc. Professor da Escola de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulos 19, 20, 23 e 28.

Mônica Carolina Ciriaco Dias Graduada em Controle de Obras e Técnica de Edificações e mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 29.

Newton Moreira de Souza Engenheiro Civil, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulos 10, 21 e 30.

Noris Costa Diniz Geóloga, DSc, Professora do Curso de Geologia e do Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 5.

Patrícia de Araújo Romão Geóloga, DSc. Professora do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais e do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: Capítulo 5.

Pedro Henrique Lopes Batista Engenheiro Ambiental, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 10.

Prabhata Kumar Swamee Engenheiro Civil, PhD. Professor do National Institute of Technology, Jalandhar, Índia.
Autoria: Capítulo 13.

Pushpa Narayan Rathie Matemático, PhD. Professor do Programa de Pós-Graduação em Estatística da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 13.

Raul Durand Engenheiro Civil, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 15.

Reinhardt Adolfo Fuck Geólogo, DSc. Pesquisador colaborador do Instituto de Geociência da Universidade de Brasília.
Autoria: Prefácio.

Renata Conciani Engenheira Civil. MSc. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e Professora da Universidade Católica de Brasília.
Autoria: Capítulo 29.

Renato Cabral Guimarães Engenheiro Civil, DSc. Engenheiro Civil da Empresa Eletrobras Furnas – Departamento de Geração Oeste e Professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Goiás.
Autoria: Capítulo 7.

Ricardo Silveira Bernardes Engenheiro Civil, PhD. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulos 6 e 8.

Roberto Quental Coutinho Engenheiro Civil, DSc. Professor dos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco.
Autoria: Capítulos 28.

Silvia Suzuki Engenheiro Civil, MSc. Pesquisadora.
Autoria: Capítulo 26.

Silvio Romero de Melo Ferreira Engenheiro Civil, DSc. Professor dos Cursos de Graduação e Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco e da Universidade Católica de Pernambuco.
Autoria: Capítulos 9, 23 e 27.

Tatiana Diniz Gonçalves Geógrafa, DSc. Profissional liberal.
Autoria: Capítulo 2.

Thiago Quintiliano de Castro Engenheiro Florestal, MSc. Assistente Ambiental da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Goiás.
Autoria: Capítulo 6.

Veroska Dueñas Zambrana Engenheira Civil, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Autoria: Capítulo 24.

Wagner Santos de Almeida Engenheiro Operacional Mecânico, DSc. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.
Autoria: Capítulo 30.

Willy Alvarenga Lacerda Engenheiro Civil, PhD. Professor colaborador da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro e Coordenador do REAGEO (Instituto Geotécnico de Reabilitação de Encostas e Planícies).
Autoria: Capítulo 26.

Wilson Conciani Licenciado em Educação Profissional, Engenheiro Civil, DSc. Professor de Educação Profissional no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília.
Autoria: Capítulo 29.

Sumário

Capítulo 1
A infiltração no contexto da Educação Ambiental, da Engenharia e do Direito

1 Introdução **2**
2 A infiltração e o equilíbrio ambiental 2
3 A educação ambiental e a infiltração 4
4 A engenharia e a infiltração 7
5 O direito e a infiltração 10
5.1 Repartição de competências em matéria ambiental e efetividade das Leis 10
5.2 Aspectos constitucionais 12
5.3 Princípios de Direito Ambiental 14
5.4 Responsabilidade por danos ao meio ambiente 18
6 Considerações finais 21
Referências bibliográficas 21

Capítulo 2
A infiltração no contexto do plano urbanístico e dos projetos paisagístico e arquitetônico

1 Introdução 25
2 Urbanismo 27
2.1 Fatores externos 27
2.1.1 Insolação 28
2.1.2 Temperatura 32
2.1.3 Umidade relativa 34
2.1.4 Precipitação 34
2.1.5 Vento 36
2.2 Fatores internos 36
2.3 Fatores de superfície 41

3 Paisagismo 41
4 Projeto arquitetônico 43
5 Regulação e controle 44
6 Considerações finais 45
Referências bibliográficas 45

Capítulo 3
A influência do clima na infiltrabilidade do solo

1 Introdução 49
2 Clima 50
2.1 Interface solo e clima nas regiões tropicais 52
3 Análise sazonal da umidade e a influência no comportamento hidráulico dos solos 54
3.1 Características geoambientais do Município de Goiânia/GO 54
3.2 Variação no comportamento da precipitação, da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e da temperatura aparente da superfície 55
3.2.1 Análise da variação e tendência dos atributos climáticos precipitação do ar, temperatura e umidade relativa do ar: série histórica 1961 a 2008 55
3.2.2 Análise da variação da temperatura aparente da superfície do terreno: inverno/2010 59
3.3 Caracterização químico-mineralógica e geotécnica dos perfis de solos estudados 62
3.4 Variação sazonal da umidade do solo 64
3.5 Curva característica e variação sazonal do processo de infiltração nos perfis de solos estudados 67
4 Considerações finais 70
Referências bibliográficas 71

Capítulo 4
A interação entre a geomorfologia e os processos de infiltração

1 Introdução 75
2 A gemorfologia 75
3 A gênese do relevo e a dinâmica da infiltração 77
4 Bacia hidrográfica: unidade de análise geomorfológica 78
5 Interações mútuas entre as formas de relevo e os processos 79
5.1 Vertentes 82
5.2 Influência dos processos de infiltração na formação do relevo 85
6 Considerações finais 86
Referências bibliográficas 86

Capítulo 5
Aspectos geológicos e infiltração

1 Introdução 89
2 Ciclo hidrológico 89
3 Porosidade, permeabilidade e tipos de aquíferos 91
4 Aspectos geológicos dos aquíferos 93
5 Estudo de caso: Distrito Federal 96
6 Estudo de caso: mapa de domínios aquíferos do Brasil 97
7 Considerações finais 98
Referências 99

Capítulo 6

A infiltração e o escoamento superficial

1 Introdução 101
2 Definições 101
3 Movimento de água através do solo 102
4 Infiltração e escoamento superficial 103
4.1 Problemas da impermeabilização – geração do escoamento 104
5 Modelagem matemática da infiltração 105
5.1 Modelos empíricos 106
5.1.1 Modelo de Horton 106
5.1.2 Modelo SCS (Soil Conservation Service) 107
5.2 Modelos conceituais 108
5.2.1 Modelo de Green-Ampt 108
5.2.2 Modelo de Philip 110
6 Exemplo de aplicação 111
6.1 Modelo de Horton 111
6.2 Modelo SCS 112
6.3 Modelo de Green-Ampt 114
6.4 Método de Philip 115
Referências bibliográficas 116

Capítulo 7
Perfil de intemperismo e infiltração

1 Introdução 117
2 Os solos tropicais 118
2.1 Perfis de intemperismo 119
2.2 Mecanismos de alteração dos minerais 121

3 Solos lateríticos 122
3.1 Aspectos químicos 123
3.2 Aspectos mineralógicos 124
3.3 Aspectos físicos 125
3.3.1 Textura 126
3.3.2 Plasticidade 128
3.3.3 Densidade real dos grãos 130
4 Solos saprolíticos 131
4.1 Aspectos químicos 132
4.2 Aspectos mineralógicos 132
4.3 Aspectos físicos 134
4.3.1 Textura 134
4.3.2 Plasticidade 135
4.3.3 Densidade real dos grãos 137
5 Considerações finais 138
Referências bibliográficas 138

Capítulo 8

Qualidade da água e suas relações com a infiltração no solo

1 Introdução 143
2 Qualidade da água 143
2.1 Propriedades físicas da água no ambiente natural 145
2.2 Propriedades químicas da água no ambiente natural 145
2.3 Presença de organismos nas águas naturais 146
2.4 Qualidade da água em águas naturais – aquíferos 147
2.5 Efeito das ações antrópicas na qualidade da água 147
3 O solo como ambiente ecológico 148
3.1 Características físico-químicas 148
3.2 Características biológicas 149
4 Efeitos da infiltração e da percolação na qualidade da água 150
4.1 Principais mecanismos de melhoria da qualidade da água infiltrada no solo .. 151
4.1.1 Matéria orgânica biodegradável 152
4.1.2 Organismos 152
4.1.3 Nitrogênio e Fósforo 152
4.1.4 Metais pesados 153
4.1.5 Compostos orgânicos resistentes à biodegradação 153
5 Usos da infiltração como processo tecnológico 153
5.1 Aspectos gerais envolvidos na infiltração como processo tecnológico 153
5.2 Processo de infiltração – águas naturais 154
5.3 Processo de infiltração – efluentes de processos 154
5.4 Contaminação versus remediação 155

6 Considerações finais 156
Referências bibliográficas 156

Capítulo 9
O comportamento de solos não saturados submetidos à infiltração

1 Introdução 157
2 Alguns fundamentos da mecânica dos solos não saturados 158
3 **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados** 161
4 Solos colapsíveis 166
4.1 Ensaios para a avaliação de solos colapsíveis 168
4.2 O colapso por infiltração no campo 171
5 Solos expansivos 173
6 Considerações finais 180
Referências bibliográficas 180

Capítulo 10
Análises de cenários de suscetibilidade a inundações e alagamentos

1 Introdução 183
2 Construção dos cenários de áreas passíveis de inundação 186
2.1 Atributos do meio físico 186
2.2 Uso e cobertura do solo 189
2.3 Hipsometria 193
2.4 Declividade 193
2.5 Área de fluxo acumulado e distância de drenagem 193
2.6 Ponderação 195
2.7 Operação de dados pelo método de análise hierárquica 196
3 Cenários de inundação 198
4 Considerações finais 202
5 Referências bibliográficas 203

Capítulo 11
Queimadas, práticas agrícolas, recuperação de áreas degradadas e a infiltração no Cerrado

1 Introdução 207
2 Fogo no cerrado: origem e consequências 208

3 Influência do fogo e de insumos agrícolas em propriedades e comportamento de um latossolo 212
3.1 Aspectos gerais 212
3.2 Materiais e métodos usados no estudo laboratorial 213
3.3 Apresentação e análise dos resultados 216
4 Restauração de áreas degradadas 222
4.1 Técnicas de recuperação 223
5 Considerações finais 227
Agradecimento 227
Referências bibliográficas 227

Capítulo 12

Avanço da frente de infiltração em solos profundamente intemperizados não saturados

1 Introdução 235
2 Materiais e métodos 235
2.1 Localização e características da área de pesquisa 235
2.2 Ensaios de campo 237
2.2.1 Infiltração pelo método do rebaixamento em furo de sondagem a trado 237
2.2.2 Determinação das umidades pelo método gravimétrico 238
3 Resultados obtidos 240
4 Considerações finais 248
Referências bibliográficas 248

Capítulo 13

Modelos teóricos de infiltração em meios porosos: equação de Richards e suas aplicações

1 Introdução 249
2 Equação de Richards 250
3 Função W de Lambert 250
4 Função W de Lambert e a equação de Green-AMPT 252
5 Função W de Lambert e a equação de Talsma-Parlange 252
6 Função W de Lambert e a equação de Richards 253
6.1 Caso (i) 255
6.1.1 Caso (i) a 255
6.1.2 Caso (i) b 256
6.2 Caso (ii) 256
6.2.1 Caso (ii) a 256
6.2.2 Caso (ii) b 257

7 Equação de infiltração de três parâmetros 261
8 Função gama de Euler e o teorema da inversão de Lagrange 262
9 Teorema da inversão de Lagrange e a equação de três parâmetros 263
10 Abordagem paramétrica da solução geral da equação de três parâmetros 265
11 Conclusão 266
Referências bibliográficas 267

Capítulo 14
Modelagem do fluxo de água e ar em solos não saturados

1 Introdução 269
2 Formulação do fluxo de água e ar 269
2.1 Conservação de massa e calor 270
2.2 Armazenagem de água e ar no solo 270
2.3 Leis de fluxo 272
2.4 Equações diferenciais parciais que governam o fluxo de água e ar 274
2.5 Condições iniciais e de fronteiras típicas em problemas de infiltração 275
3 Modelagem das propriedades do solo 277
3.1 Equações de ajuste para a curva característica solo-água 278
3.2 Equações para a função de condutividade hidráulica 280
3.3 Equações para a função de condutividade ao fluxo de ar 282
3.4 Curva característica solo-ar 283
5 Conclusões 283
Referências 284

Capítulo 15
Análise numérica de processos de infiltração em mesoescala

1 Introdução 287
2 Infiltração em mesoescala 288
3 Autômata celular 290
4 Método Lattice-Boltzmann 293
4.1 Formulação básica do MLB 294
4.2 Condições de contorno 296
4.3 Relação entre unidades de rede (lattice) e unidades físicas 297
4.4 Análises monofásicas 298
4.5 Análises multifase (líquido-gás) 299
4.5.1 Exemplos de aplicação da análise multifásica 300
4.5.2 Aplicação ao fenômeno de infiltração 302
4.6 Considerações finais 304

Agradecimento 305
Referências bibliográficas 305

Capítulo 16
Uso de geossintéticos em estruturas de drenagem e infiltração

1 Introdução 309
2 Propriedades relevantes dos geossintéticos 310
2.1 Propriedades para as funções de filtração e drenagem 310
2.2 Propriedades físicas 314
2.2.1 Gramatura (MA) 314
2.2.2 Espessura (tGT) 314
2.2.3 Porosidade (nGT) 314
2.3 Propriedades hidráulicas 315
2.3.1 Permissividade (ψ) 315
2.3.2 Transmissividade (θ) 315
2.3.3 Abertura de filtração (Of) 316
2.4 Efeito das tensões e da pré-impregnação nas propriedades físicas e hidráulicas 317
2.5 Ensaios para determinação das propriedades dos geossintéticos 318
2.5.1 Capacidade de fluxo normal ao plano 318
2.5.2 Capacidade de fluxo ao longo do plano 318
2.5.3 Abertura de filtração 319
2.5.4 Ensaio de filtração do tipo razão entre gradiente 321
3 Aspectos construtivos 322
3.1 Especificação 322
3.1.1 Metodologia construtiva 322
3.2 Critérios de projeto 322
3.2.1 Critério de retenção 323
3.2.2 Critério de permeabilidade 324
3.2.3 Critério de colmatação 324
3.2.4 Critério de sobrevivência 324
4 Comentários finais 235
Referências bibliográficas 325

Capítulo 17
Estruturas superficiais de infiltração: colchões drenantes

1 Introdução 331
2 Conceitos 333
2.1 Valas de infiltração 333

2.2 Colchão drenante 335
3 Vantagens e desvantagens de um sistema de armazenamento e infiltração superficial 336
3.1 Vantagens 336
3.2 Desvantagens 336
4 Pesquisa utilizando colchão drenante 337
4.1 Materiais utilizados na execução do colchão drenante 337
5 Resultados dos ensaios de campo e laboratório 340
5.1 Ensaio de Infiltração 340
5.2 Ensaio panda 341
5.3 Difratometria de raios X (DRX) 341
5.4 Ensaios de caracterização física cilindros 342
5.5 Ensaios da classificação MCT 343
5.6 Ensaio de permeabilidade 344
5.7 Ensaio do furo de agulha (pinhole test) 344
5.8 Sucção 345
5.9 Ensaio de cisalhamento direto 346
5.10 Ensaios de adensamento e análise de colapsibilidade 348
6 Análise do colchão drenante enquanto sistema de infiltração 349
7 Conclusões 349
Agradecimento 350
Referências bibliográficas 350

Capítulo 18
Trincheiras como estruturas de infiltração

1 Introdução 353
2 Aspectos relativos aos mecanismos de infiltração 355
3 Trincheiras como estruturas de infiltração 357
3.1 Considerações sobre a implantação das trincheiras 359
3.2 Vantagens e desvantagens 360
3.3 Dimensionamento 361
3.4 Execução e manutenção 362
3.5 A função do geotêxtil nas trincheiras de infiltração 362
4 Garrafas pet como material de enchimento de trincheiras 364
4.1 Materiais Utilizados no enchimento das trincheiras 365
4.2 Tipos de arranjos 366
4.3 Monitoramento das trincheiras de infiltração 368
5 Considerações finais 372
Agradecimentos 372
Referências bibliográficas 372

Capítulo 19
Poços como estruturas de infiltração

1 Introdução 375
2 Estruturas utilizadas para o controle na fonte da drenagem urbana 376
3 Conceitos gerais sobre o projeto de poços de infiltração 378
4 Fatores que influenciam o processo de infiltração 381
5 Ensaios de laboratório e campo para projeto de poços de infiltração 383
5.1 Ensaios de campo 385
5.2 Ensaio em poço 386
5.3 Interpretação de ensaios de infiltração em poço 387
5.4 Resultados típicos de ensaios de infiltração em poço 389
5.4.1 Ensaio de infiltrômetro de anéis concêntricos 390
5.4.2 Condutividade hidráulica e permeabilidade 392
6 Dimensionamento de estruturas de infiltração 392
6.1 Cálculo do volume de aporte 392
7 Exemplo de execução de sistema composto de poços e trincheiras 395
8 Considerações finais 398
Agradecimentos 398
Referências bibliográficas 399

Capítulo 20
Sensibilidade do desempenho de poços de infiltração às propriedades do solo não saturado

1 Introdução 401
2 Abordagem formal para a análise de sensibilidade 402
3 Materiais e métodos 404
3.1 Geometria, condições iniciais e de contorno 405
3.2 Parâmetro de desempenho dos poços 406
3.3 Variabilidade das propriedades do solo 407
3.3.1 Curva característica solo-água 407
3.3.2 Função de condutividade hidráulica 409
4 Validação do modelo numérico 409
5 Resultados 410
6 Considerações finais 417
Agradecimentos 418
Referências 418

Capítulo 21
Mapeamento da infiltração no Distrito Federal

1 Introdução 419

1.1 Domínio poroso 420
1.2 Domínio fraturado 421
2 Caracterizando a infiltração em escala regional 421
3 Considerações finais 425
Referências bibliográficas 427

Capítulo 22
Análise e gestão do risco

1 Introdução 429
2 Gestão do risco 431
3 Políticas do risco 432
4 Estratégias de gestão do risco 434
5 Critérios de aceitação do risco 434
6 Análise do risco 435
6.1 Análise qualitativa 435
6.2 Identificação e classificação das ameaças 436
6.3 Classificação por frequência ou classificação da P(A) 438
6.4 Classificação por consequência 438
7 Determinação qualitativa e classificação do risco 438
8 Análise quantitativa 442
Referências bibliográficas 443

Capítulo 23
Risco em obras devido à infiltração

1 Introdução 445
2 Infiltração próxima a fundações 445
3 Infiltração em aterros 448
4 Infiltração próxima a taludes naturais 449
5 Infiltração próxima a obras rasas 452
Referências bibliográficas 455

Capítulo 24
Infiltração e estabilidade de encostas em condições não saturadas

1 Introdução 457
2 Mecanismos de instabilização 458
3 Causas de instabilização das encostas devido à infiltração 459

4 Influência da infiltração na instabilização das encostas 464
5 Escorregamentos em encostas não saturadas decorrentes de infiltração 470
Conclusões 477
Agradecimentos 478
Referências bibliográficas 478

Capítulo 25
Efeito da infiltração na elevação de nível freático nas encostas

1 Introdução 481
2 Escorregamentos causados por infiltração que geraram pressão de água positiva 481
2.1 Escorregamento do Morro da Caneleira-Santos-SP 482
2.2 Escorregamento do Monte Serrat-Santos-SP 483
2.3 Escorregamento da Encosta do Cactáreo-RJ 484
2.4 Escorregamento da Lagoa-RJ 484
2.5 Escorregamento em São Mateus-SP 486
3 Infiltração, escorregamentos e desastres naturais 487
4 Infiltração decorrente de ação antrópica 493
4.1 Escorregamento no Alto do Bom Viver 493
4.2 Escorregamento na Encosta do Alto do Reservatório, Recife-PE 493
4.3 Escorregamento em Nova Friburgo-RJ 494
4.4 Escorregamento no Túnel Rebouças, Rio de Janeiro-RJ 495
4.5 Metodologia para definir a contribuição da precipitação antrópica 497
Conclusões 499
Agradecimentos 500
Referências bibliográficas 500

Capítulo 26
Infiltração e movimentos de massas coluvionares saturadas

1 Introdução 503
2 Mecanismos de instabização em depósitos coluviovionares 504
3 Infiltração em solos coluvionares 505
4 Casos de escorregamentos em solos coluvionares 507
4.1 Movimentação de tálus junto à Usina Henry Borden 507
4.2 Escorregamento da Serra do Mar na área da cota 500 (Curva da Onça) da Via Anchieta em São Paulo 508
4.3 Morro dos Urubus 510
4.4 Angra do Reis 512

4.5 Escorregamento em Itacuruça-RJ 513
4.6 Escorregamento em Morretes-PR 516
4.7 Escorregamento na Vila Albertina-SP 518
5 Análises dos casos apresentados e conclusões 520
Referências bibliográficas 522

Capítulo 27
Colapso do solo devido à inundação: um estudo de caso

1 Introdução 525
2 Caracterização geotécnica do solo 526
3 Influência da vazão de inundação 528
3.1 Comportamento reológico 531
3.2 Relação entre a umidade do solo e o processo de colapso 532
4 Influência do tipo de permeante 533
5 Técnicas de melhoramento 537
5.1 Soluções anteriores à construção sem modificação do solo 537
5.2 Soluções anteriores à construção com modificação do solo 538
5.3 Soluções posteriores à construção 539
Agradecimentos 540
Referências bibliográficas 540

Capítulo 28
A infiltração e os fenômenos da inundação, erosão e esqueletização do maciço

1 Introdução 543
2 Conceitos básicos 544
3 Características das águas pluviais e sua influência no processo de infiltração e na estabilidade estrutural do solo 546
4 A infiltração e sua relação com alagamentos e inundações 549
5 A infiltração e sua relação com os processos erosivos de origem pluvial 551
6 A erosão interna e outros processos que atuam no desencadeamento e na evolução das erosões 555
7 O fenômeno da esqueletização e sua relação com a infiltração e evolução dos processos erosivos 556
8 A infiltração e os modelos de evolução das erosões 557
9 Técnicas de ensaio utilizadas no estudo da infiltrabilidade e da erodibilidade 561
10 Considerações finais 561
Referências bibliográficas 562

Capítulo 29

Infiltração – outros impactos físicos e químicos

1 Introdução 565
2 Erosão nas regiões cársticas 566
2.1 Erosões pseudocárstica em solos 567
3 Erosão por pipping 571
4 A prospecção de áreas atingidas pela erosão subterrânea 572
4.1 Previsão por ensaios físicos de laboratório 578
5 Síntese 578
Referências bibliográficas 578

Capítulo 30

Produção de carta geotécnica preliminar de capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica Corumbá IV (GO)

1 Introdução 581
2 Área de estudo 582
3 Materiais e métodos 583
3.1 Materiais utilizados 583
3.1.1 Materiais para produção dos modelos numéricos de terreno (MNT) 583
3.1.2 Imagem digital de sensores remotos orbitais 583
3.1.3 Ortofotos digitais 584
3.1.4 Dados de campo 584
3.1.5 Mapas temáticos 584
3.1.6 Dados de pluviometria 584
3.2 Metodologia 584
3.2.1 Produção dos modelos numéricos de terreno (MNT) 584
3.2.2 Determinação das zonas homólogas e reclassificação dos mapas temáticos .. 585
3.2.3 Ensaios geotécnicos em amostras de solo 586
3.2.4 Produção do mapa temático de uso e cobertura do solo 587
3.2.5 Produção da carta geotécnica de perda de solos baseada na Equação Universal de Perdas do Solo (EUPS) e sua adaptação para a avaliação preliminar da capacidade de infiltração da água no solo 588
4 Resultados obtidos e conclusões 593
4.1 Modelos numéricos do terreno (MNT) da área de estudo 593
4.2 Mapa de zonas homólogas 593
4.3 Resultados obtidos para os solos em laboratório e no campo 595
4.4 Produção do mapa temático de uso e cobertura do solo 600
4.5 Imagens obtidas para os parâmetros da EUPS 601

4.5.1 Produção do mapa de erosividade da chuva (fator R) 602
4.5.2 Produção do mapa de infiltrabilidade (1/k) do solo 602
4.5.3 Produção do mapa de fator de relevo (fator LS) e dos mapas de manejo do solo e de práticas conservacionistas (fator CP) 602
4.6 Produção da carta geotécnica de infiltração de solos 603
5 Considerações finais 604
Agradecimentos 605
Referências bibliográficas 605

Capítulo 31
Infiltração em pavimento: problemas e soluções

1 Introdução 607
2 Pavimentos drenantes 607
3 Infiltrações indesejáveis a partir das estruturas de pavimento 610
4 Problemas oriundos do lançamento de sistemas de drenagem de pavimentos 613
5 Alguns exemplos de pavimentos permeáveis 614
6 Influência da umidade no comportamento dos solos tropicais 615
7 Considerações sobre o projeto e a construção de pavimentos permeáveis 617
8 Considerações finais 619
Referências bibliográficas 619

Capítulo 32
Considerações sobre aspectos relacionados aos sistemas de infiltração de águas pluviais

1 Introdução 621
2 Educação e legislação 621
3 A energia no contexto dos comportamentos hidráulico e mecânico 623
4 O clima e a interação solo-atmosfera 627
5 Forma do relevo e cobertura do solo 628
6 A importância da qualidade da água 628
7 A importância do perfil de intemperismo 629
8 A infiltração frente ao estado não saturado do solo e algumas de suas consequências 630
9 Considerações sobre a forma geométrica dos sistemas de infiltração 631
10 Riscos inerentes à infiltração 634
11 Alguns dos estudos de maior relevância 634
12 Considerações finais 635
Referências bibliográficas 636

Fotografias utilizadas na composição da capa deste livro 639
Ipê Amarelo 641
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 14/08/2011.
Madona, Bico de Pena de Alberto Crispim Gonçalves, 1983 641
Fotografia de Gilson da Silva Menezes, 27/06/2012.
Erosão, Planaltina, GO 642
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 12/01/2011.
Alagamento, rua Major Manoel Corrêa, bairro São Francisco, Boa Vista, RO 642
Fotografia de Cláudia Marcia Coutinho Gurjão, 23/06/2006.
Pôr do Sol, GO-225, Pirenópolis, GO 643
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 13/05/2011, 18h53min.
Nascer do Sol, SHIS QI 27, Brasília, DF 643
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 16/06/2012, 07h50min.
Bacia de retenção, BR-060, Km 24, Alexânia, GO 644
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 05/01/2011.
Cachoeira no Município de Pirenópolis, GO 644
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 12/07/2011.

Capítulo 1
A infiltração no contexto da Educação Ambiental, da Engenharia e do Direito

José Camapum de Carvalho
Janaína Teixeira Camapum de Carvalho
Márcia Dieguez Leuzinger

1 Introdução

Ao assumir a proposta de tratar o tema Infiltração no contexto da Educação, da Engenharia e do Direito, a primeira dúvida que veio à mente foi sobre qual aspecto tratar primeiro. Em uma breve reflexão é possível perceber que a Educação é sempre a base, o suporte na continuidade e o instrumento básico para o cumprimento de um fim como este que se prevê com a infiltração: a preservação do equilíbrio ambiental dando suporte ao desenvolvimento sustentável. Em segundo lugar, deve vir no contexto deste livro a Engenharia, pois, ao mesmo tempo em que é responsável por inúmeras obras e iniciativas que levam à impermeabilização da superfície do solo, constitui-se, enquanto engenharia, em caminho para resolver problemas que muitas vezes ela mesma gerou. Finalmente vem o Direito, não por situar-se nessa sequência em grau de importância inferior aos demais aspectos, mas apenas porque o Direito deve ser visto como um instrumento de pacificação, um meio de suprir deficiências, buscando assegurar para a sociedade um desenvolvimento sustentável, impedindo rupturas do equilíbrio ambiental e riscos elevados à sua própria segurança.

Contextualizando o tema Infiltração, na natureza, a depender de uma série de fatores, parte ou mesmo a totalidade das águas pluviais precipitadas sobre as áreas não inundadas se infiltram, e parte é conduzida aos lagos, mares e oceanos de modo disperso ou concentrado em sistemas de drenagem naturais, tais como talvegues, córregos e rios. Esse processo estabeleceu ao longo dos anos certo equilíbrio que pode ser rompido com a ocupação e o uso do solo de forma desordenada, alterando as características de suporte do meio físico. Para evitar que isso ocorra, surge como elemento indispensável no trato do tema a Educação, voltada para a informação, para a construção de uma consciência fundamentada nas causas e consequências da impermeabilização.

Voltando o olhar para a Engenharia, que atua suprindo necessidades da própria sociedade, é possível perceber que muitos dos problemas de impermeabilização têm raiz em deficiências na educação do administrador público, do empreendedor privado, dos engenheiros e operários e da própria sociedade que a tudo assiste e de tudo participa sem que consiga perceber os próprios riscos a que está se submetendo em consequência de determinadas práticas.

Finalmente, para suprir deficiências e garantir a segurança da sociedade, tem-se o Direito como elemento regulador. Sempre que a deficiência na educação mostra sua face, surge

uma legislação coercitiva para regulá-la. Mas sua presença física não é, muitas vezes, suficiente para regular o problema, porque lhe falta efetividade, e retorna-se ao mais importante dos instrumentos reguladores, a Educação, enquanto traço cultural construído.

Acredita-se que a Educação, a Engenharia e o Direito podem, conjunta e harmonicamente, dar importante contribuição para que se minimizem as probabilidades de ocorrência de desastres que se apresentam com eventos naturais extremos, mas cuja origem está, muitas vezes, nas próprias intervenções da sociedade no meio físico. Essas áreas do conhecimento podem ainda, em especial a Educação, contribuir para que se consiga orientar ações de redução das consequências dos desastres.

Faz-se oportuno situar já nesta introdução os principais problemas ambientais ligados à questão da infiltração, aqui entendida como restrita às aguas de origem pluvial. Em primeiro lugar, é preciso que se entenda que a infiltração pode ser solução para muitos problemas socioambientais oriundos de eventos extremos ou não, mas pode também constituir-se em fonte de problemas. A infiltração das águas pluviais oriundas de áreas impermeabilizadas pode constituir-se em solução de problemas como erosões e inundações; porém, se mal concebida, pode tornar-se fonte desses mesmos problemas ao dar origem a fenômenos como os de erosão interna, subsidências e rupturas de encostas. Isso carrega o tema de maior complexidade e exige maior reflexão no educar, no praticar a engenharia e no legislar.

Este capítulo buscará indicar elementos importantes de Educação, de Engenharia e de Direito que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável. Não se pretende aqui tratar de modo exaustivo qualquer destes aspectos, até porque isso seria muita pretensão por parte dos autores.

2 A infiltração e o equilíbrio ambiental

A infiltração das águas pluviais constitui-se em elemento natural integrante do equilíbrio ambiental, visto sob a óptica da dinâmica da natureza. Se o escoamento superficial natural da água da chuva propicia a erosão geológica, a sua infiltração é, em grande parte, responsável pela alteração das rochas e formação dos solos, impondo certa condição de equilíbrio entre erosão e formação do solo. Ao mesmo tempo, dentre outros fatores, tanto o escoamento superficial, como a infiltração, atuam na modelagem natural do relevo, dando contornos geomorfológicos importantíssimos para o equilíbrio ambiental. O fluxo natural tanto de superfície como de subsuperfície atuam no processo de formação dos solos, induzindo-lhes maior ou menor susceptibilidade à erosão.

A impermeabilização antrópica do solo altera ao mesmo tempo a taxa de escoamento superficial e a de infiltração, podendo graves problemas socioambientais, como os já citados na introdução, quais sejam: erosão, inundação, rupturas de encosta. Para mitigar ou mesmo evitar tais problemas, faz-se necessário conceber práticas e instrumentos compensatórios, como os sistemas de drenagem e de regulação do fluxo superficial. Com isso, torna-se possível assegurar o desenvolvimento sustentável, fundamentado no uso racional e planejado dos recursos naturais, na ocupação e no uso cuidadoso do solo. É certo não ser tarefa fácil e simples, tampouco impossível, garantir a sustentabilidade ambiental no Brasil, um país caracterizado por imenso território dotado da maior biodiversidade do planeta. Para que se tenha em

mente a envergadura do desafio de se promover o desenvolvimento sustentável, destaca-se, a título de exemplo, que o bioma cerrado, segundo maior bioma do país, extremamente rico em termos de biodiversidade, além de representar um papel decisivo na questão das mudanças climáticas, por sua capacidade de absorção de carbono, possui, hoje, apenas pouco mais de 5% da vegetação originária preservada. O escoamento superficial e a infiltração natural já foram alterados em sua quase totalidade, isso sem que se considerem as eventuais alterações no nível e regime de precipitação por força do próprio antropismo.

Sabe-se que toda intervenção humana no meio ambiente gera como resultado algum impacto ambiental, podendo este ser positivo ou negativo. No que tange à infiltração, o impacto pode se dar nos dois sentidos. O seu estudo deve ter como objetivo avaliar a intervenção causada no meio ambiente, buscando a manutenção ou retomada do equilíbrio ambiental. A superficialidade de certos estudos ambientais iniciais impede o planejamento realista do uso e ocupação do solo, gerando ao longo do tempo custos ambientais e financeiros desnecessários e, na maioria das vezes, ambientalmente irreversíveis.

A preservação ou a recuperação do equilíbrio ambiental em áreas impermeabilizadas ou em processo de impermeabilização deve objetivar a manutenção ou restauração das suas características originais de infiltração. Quase sempre essas ações não conseguem manter ou restabelecer as condições originais, embora até se possa conseguir infiltrar todo o volume de água precipitado na área impermeabilizada. Sendo assim, o ideal é, sempre que possível, buscar-se preservar áreas naturais intactas. Mudanças nas características da infiltração, como localização e ampliação pontual do volume e da taxa de infiltração, apesar de serem, por um lado, benéficas, por possibilitarem a recarga do aquífero e evitar problemas como os de erosão e inundação, por outro, podem dar origem a diversos problemas, como os de subsidência, erosão interna e eventualmente contaminação do solo e do lençol freático.

Quando da precipitação em áreas naturais, geralmente apenas parte da água da chuva se infiltra e parte escoa superficialmente. No entanto, quando se concebe um sistema de infiltração das águas pluviais, quase sempre se busca o todo e não apenas a infiltração compensatória suficiente para repor no subsolo a água que naturalmente se infiltrava. Tal prática deve sempre ser avaliada, pois eventualmente a infiltração do volume excedente, além de poder gerar problemas no local onde ocorre, pode ainda propiciar a escassez de água à jusante favorecendo o surgimento de desequilíbrio ambiental. Nesses casos, deve-se buscar associar os sistemas de infiltração a sistemas de simples retenção ou detenção que atuarão regulando os picos de vazão e possibilitando, de modo controlado, a condução de parte da água precipitada para jusante. Outra possibilidade, ainda na direção de se buscar preservar o equilíbrio ambiental, diz respeito à utilização de parte da água precipitada em atividades humanas, tais como molhagem de jardins, lavagem de pisos e parte do consumo doméstico, como uso em vasos sanitários.

Tem-se, ainda, que a maioria dos sistemas de drenagem fundados na infiltração privilegia a evacuação concentrada da água, ampliando pontualmente a carga hidráulica e as condições de saturação do solo, oferecendo certos riscos a serem avaliados, como os de subsidência e erosão interna localizados. Mas em muitos casos é possível projetar sistemas de infiltração compensatórios equivalentes aos que ocorriam naturalmente. Como exemplos, citam-se as infiltrações nos pavimentos e estacionamentos permeáveis, nos quais a área de precipitação corresponde à de infiltração.

Portanto, a infiltração deve antes tudo ser vista como importante para a preservação do equilíbrio ambiental, requerendo, no entanto, cuidados para que não gere problemas antes inexistentes.

3 A educação ambiental e a infiltração

A Lei 9.795 de 27 de abril de 1999 dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. O artigo 1º dessa Lei apresenta um conceito amplo do que é educação ambiental:

> **Art. 1º** Entendem-se por educação ambiental os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade.

O artigo 2º da Lei considera a educação ambiental um componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente de forma articulada, em todos os níveis e modalidades do processo educativo, em caráter formal e não formal. Talvez a maior lacuna se situe exatamente na falta dessa articulação, na pouca vontade política de mudar, na visão míope de que o meio ambiente e a sustentabilidade ambiental são irrelevantes. É preciso perceber que não vale a pena enriquecer materialmente perdendo o que se tem de mais precioso, o bem da vida, o meio ambiente.

Como mencionado na introdução deste capítulo, a educação perpassa todos ou quase todos os níveis dos problemas socioambientais oriundos do excesso de impermeabilização do solo. No entanto, culturalmente esses problemas são, geralmente, vinculados a questões de ordem política e técnica ou à falta de efetividade dos regulamentos administrativos e das normas técnicas e jurídicas existentes.

No que tange à necessidade de se preservar ou propiciar a infiltração das águas pluviais, ainda que o plano diretor tenha sido juridicamente o mais perfeito possível, que tenham sido fixados de modo apropriado os coeficientes de ocupação e uso do solo e previsto o uso de pavimentos permeáveis de modo a maximizar a infiltração das águas pluviais, ainda assim não é possível negligenciar a educação ambiental, até mesmo porque os administradores e os empresários só procederão nos modos especificados se tiverem sido para isso educados.

A educação ambiental não pode ser privilégio de poucos. É preciso, ao mesmo tempo em que se educa, buscar formar uma consciência socioambiental. A título de exemplo de sua importância, tem-se que, ao se fixar um coeficiente máximo de aproveitamento do solo como igual a 70%, espera-se que os outros 30% não edificáveis sejam preservados. No entanto, o que se observa comumente é que essa área é revestida com os mais diferentes tipos de cobertura impermeável, como piscinas, pisos de concreto e pesos cerâmicos. Tal prática quase sempre se dá por absoluta falta de conhecimento sobre a importância da infiltração e as consequências maléficas de sua ausência. A educação mostra-se aqui deficiente; o traço cultural relativo à responsabilidade socioambiental do cidadão e da coletividade não mostra sua face. Ao mesmo tempo, a fiscalização vinculada ao poder de polícia da Administração Pública também não é exercida, ou o é de modo limitado, muitas vezes por se desconhecer sua importância

para a preservação ambiental, ou seja, por deficiência na educação ambiental. Se existia um regulamento e este não foi cumprido, faltou-lhe efetividade, provavelmente também por desconhecimento de que a impermeabilização é danosa ao meio ambiente. Mais uma vez aqui sobressai a deficiência da educação ambiental. É preciso que se diga que quase sempre o simples conhecimento recebido, com a mensagem transmitida *en passant*, seja na educação formal seja na não formal, não é muitas vezes suficiente para formar a consciência, estabelecendo o lastro ético-moral que faria agir pensando no equilíbrio ambiental, na segurança da sociedade e nas gerações presentes e futuras.

Camapum de Carvalho (2009a, p. 74) assim exprime o modo como deve se dar a educação ambiental:

> ... saindo da responsabilidade do cidadão comum, daquele que impermeabiliza os poucos metros não edificáveis do seu lote, daquele que lança papel, toco de cigarro e outros dejetos nas ruas, obstruindo os sistemas de drenagem de águas pluviais, para atingir a responsabilidade do técnico, do engenheiro, do geólogo, do arquiteto, do operador do direito etc., é preciso pensar em uma educação reflexiva, aquela em que se leve em conta a resposta da natureza a toda e qualquer ação antrópica. Assim, ao se definir as áreas e coeficientes de aproveitamento, é necessário levar em conta a intervenção no balanço hídrico, na biota, no clima, na vida e em sua qualidade. É preciso refletir sobre a necessidade de recarga dos aquíferos, sobre o excesso de fluxo superficial, sobre os lançamentos das galerias de drenagem de águas pluviais nos mananciais, sobre o assoreamento que poderá ocorrer nos cursos d'água e reservatórios, sobre os revestimentos ambientalmente mais adequados para as vias públicas. Mas tudo isso ultrapassa os conhecimentos técnicos e jurídicos vistos nos bancos de escolas e nas universidades, isso porque ensinamos o que aprendemos e do modo que apreendemos, dentro de uma visão pontual e estática dos problemas, uma visão que se fixa na perfeição das partes e esquece a necessidade do equilíbrio do todo. Mas a ação técnica e do operador do direito não carece apenas de uma visão temporal mais ampla, ela requer também o fortalecimento da integração multidisciplinar. Portanto, ao se ensinar engenharia, geologia, arquitetura, direito etc. é necessário integrar ao conteúdo as questões ambientais às consequências da ação humana para o meio ambiente.

Diante do exposto, parece claro que a mudança de comportamento da população e da administração pública em relação ao meio ambiente passa pela necessidade imediata de educação ambiental em todos os níveis da educação formal e não formal, incluindo-se aqui a informação como direito da coletividade e como dever do Estado. Nesse sentido, Lanfredi (2001) situa a educação como medida preventiva da proteção ambiental e espera sua efetiva incorporação como parte essencial do aprendizado em todos os níveis do ensino, seguida de permanente conscientização da comunidade. Nesse sentido, o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, conjuntamente com o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, tem desenvolvido material didático sobre temas ambientais relevantes para o Brasil que atingem todos os níveis do ensino formal e também se aplicam a educação não formal. O material didático desenvolvido encontra-se disponível no site www.geotecnia.unb.br (Pós-Graduação, Publicações, Outros). Como principais publicações conjuntas desses Programas de Pós-Graduação, destacam-se o presente livro, o livro "Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro", ambos

voltados para estudantes universitários, pesquisadores e profissionais; as cartilhas "Erosão e Infiltração", voltada para a sexta série em diante do ensino fundamental, ensino médio e educação não formal; as cartilhas "Meio Ambiente: Erosão" e "Meio Ambiente: Infiltração", voltadas para a primeira a quinta séries do ensino fundamental e educação não formal.

No que tange à abrangência que a educação ambiental deve assumir, Dias (1998, p. 25-27) indica que "tratar a questão ambiental abordando-se apenas um dos seus aspectos – o ecológico – seria praticar o mais ingênuo e primário reducionismo". É necessário que se considerem diversos aspectos – os ecológicos, os sociais, os culturais, os éticos, os políticos, os científicos, os tecnológicos e os econômicos –, mas não com o mesmo grau de intensidade, pois em cada situação eles possuem dinâmicas distintas.

Destaca-se que a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – Agenda 21 (1992), já chamava a atenção, no capítulo 36, que trata do ensino, da conscientização e do treinamento, para a necessidade de se tratar o meio ambiente e o próprio desenvolvimento como multidisciplinar e, principalmente, interdisciplinar, envolvendo os vínculos socioculturais e demográficos. Esse entendimento assume grande importância em um país com a dimensão do Brasil, onde os problemas ambientais raramente se repetem; quando se repetem apresentam nuances próprias e, muitas vezes, encontram-se associados a peculiaridades regionais, sociais e culturais. Nesse sentido, segundo Cascino (2000), deve-se considerar o ensino ambiental não mais com um "olhar de fora", mas com um "olhar de dentro", um "colocar-se no ambiente", ambiente enquanto meio físico, social e cultural. Portanto, a educação ambiental deve ir além do meio físico, faz-se necessário contextualizá-la regional e socioculturalmente.

No contexto das engenharias e de outros ramos das ciências com maior elo com a questão ambiental, faz-se necessário dar maior abrangência e consistência à educação ambiental formal universitária, de modo a formar profissionais habilitados a atuarem em prol do desenvolvimento sustentável. No entanto, de modo a formar e conscientizar os profissionais já atuantes no mercado, faz-se necessária a realização não só de cursos formais sobre meio ambiente, mas também de cursos não formais, de modo a se alcançarem maior efetividade e abrangência na educação ambiental em curto prazo.

Saindo da educação ambiental em sentido amplo para tratar especificamente do tema infiltração, o primeiro ponto a ser levantado é sobre que aspectos da infiltração são relevantes para determinada região ou meio urbano. Em algumas localidades, a infiltração tem por objetivo único a recarga do aquífero; em outras, pode evitar que se gerem erosões, inundações e rupturas de encosta. O tema infiltração, como na maioria dos demais casos relacionados à educação ambiental, deve ser contextualizado no meio físico, social e cultural, de modo que todos ofereçam sua parcela de contribuição para a preservação do equilíbrio ambiental e promoção do desenvolvimento sustentável. A educação ambiental não pode restringir-se a ser meramente informativa; faz-se necessário que seja levada para a prática, lembrando sempre que, à medida que a educação se fortalece enquanto traço cultural, menos se requerem leis coercitivas e fiscalizações de caráter punitivo, reduzem-se enormemente os danos e custos da preservação ambiental e amplia-se a segurança da sociedade frente a eventos extremos da natureza.

Diante do exposto, sobressai a importância da educação ambiental como reguladora da preservação da capacidade de infiltração das águas pluviais. Essa preservação é fundamental para a manutenção do equilíbrio ambiental e promoção do desenvolvimento sustentável.

D'Isep (2010) considera que, enquanto a sanção pecuniária é imediatista e punitiva, a educação é preventiva e produz a conscientização, racionalização e compreensão, revelando a perspectiva de seu efeito duradouro. Para essa autora, a educação constitui o mais nobre dos instrumentos de proteção hidroambiental e deve ser realizada em todas as etapas da gestão hídrica. Essa percepção pode e deve, no entanto, ser ampliada para as questões ambientais como um todo. Nesse sentido, a educação ambiental deve não apenas fazer parte do ensino fundamental e médio, como também integrar a formação dos diferentes ramos da ciência que lidam diretamente com o meio ambiente, como é o caso da Engenharia Civil, da Agronomia, da Geologia, dentre outros.

4 A engenharia e a infiltração

A engenharia a ser tratada aqui corresponde a uma visão ampla, não se referindo especificamente a uma área de formação, embora sejam as Engenharias Civil, Agrícola, Agronômica e Florestal geralmente as mais afetas. Seria impossível, no entanto, tratar de questões de engenharia ligadas ao meio ambiente sem que se realce a importância fundamental de áreas do conhecimento como química, biologia, física, arquitetura, geografia, geologia e antropologia, não existindo aqui, em qualquer dos casos, elo entre a ordem de citação e o grau de importância, até porque este depende do contexto físico e socioambiental.

As intervenções de engenharia na superfície do solo, seja em meio urbano, seja em meio rural, propiciam com frequência alterações que deterioram a capacidade de infiltração natural. Por outro lado, se bem concebidas, os efeitos impermeabilizantes das alterações geradas podem ser mitigados e, em alguns casos, eliminados. Citar-se-ão aqui alguns exemplos ilustrativos de problemas gerados com as intervenções de engenharia e de soluções passíveis de serem adotadas especialmente em caráter preventivo.

Faz-se oportuno lembrar que a intervenção da engenharia no meio ambiente se dá quase sempre de modo satisfativo, isto é, existe uma demanda socioeconômica e a engenharia intervém para satisfazê-la. Isso evidentemente não elimina sua responsabilidade quanto a eventuais danos ambientais gerados por suas ações.

Será abordada em primeiro lugar, mesmo que *en passant*, a questão da infiltração em área rural, pela importância de seus reflexos em áreas urbanas. Em área rural, a capacidade de infiltração do solo é geralmente máxima em ambiente natural, pois foi moldada ao longo de todo o processo de formação do solo de modo a atender a certa demanda voltada para o equilíbrio ambiental. As intervenções antrópicas diretas, ou seja, aquelas que se dão modificando a fauna e a flora, ocorrem geralmente com a própria ocupação urbana, com a prática da agropecuária, com a exploração mineral e com a implantação de sistemas viários. Neste último caso, é muito comum, em razão da intervenção direta, ser possível perceber intervenções indiretas no ecossistema. Os movimentos de terra, cortes, aterros e sistemas de drenagem, por exemplo, acabam impactando indiretamente em áreas circunvizinhas, antropizadas ou não, nas quais não se interviu diretamente. Isso se dá pela alteração nos regimes de fluxo superficial e profundo e pela própria poluição atmosférica que é gerada a *posteriori*.

A prática agropecuária, ao intervir na cobertura vegetal e, muitas vezes, no próprio relevo, já gera de início alteração na capacidade de infiltração. Entretanto, o trabalho do solo

em curvas de nível e terraceamentos, criando bacias de retenção e infiltração, é suscetível de mitigar as alterações da capacidade de infiltração. Essa intervenção direta inicial acaba, se mal concebida, gerando enorme impacto em cursos d'água, reservatórios e em meios urbanos situados a jusante. A perturbação do solo aliada à ampliação do fluxo superficial provocará, em consequência de processos erosivos que se implantam, o assoreamento de cursos d'água e reservatórios e o transbordamento das calhas de drenagem naturais, dando origem ou ampliando os processos de inundação que afetam diretamente o meio urbano, em especial as áreas situadas em regiões de planície. Mas esses são impactos diretos, se não completamente sanados, perfeitamente mitigados. Mas existem ainda os impactos indiretos oriundos do aporte de insumos e das queimadas antrópicas. Embora este tema seja de modo mais abrangente tratado no capítulo 11 deste livro, é necessária aqui, uma breve análise no que tange à infiltração e ao seu impacto no meio ambiente.

Os insumos agrícolas, muitas vezes, atuam nos solos tropicais ocasionando sua desagregação. Os solos desagregados, diante dos ciclos de molhagem e secagem, passam a apresentar reduções significativas de porosidade, conferindo ao maciço certo grau de impermeabilização em sua superfície e, por consequência, redução da taxa de infiltração das águas pluviais e ampliação do escoamento superficial, o que acaba impactando por meio de transbordamento dos cursos d'água e inundações no meio urbano. Mas é preciso que se diga, ainda, que a atuação instabilizadora da estrutura do solo que compõe o maciço como um todo é susceptível de atuar, a médio e longo prazo, como elemento indutor da ocorrência de fenômenos como as rupturas de encostas e as subsidências, os quais, muitas vezes, impactam diretamente o meio urbano.

Em área urbana, a capacidade de infiltração natural é inexoravelmente reduzida na superfície do terreno por meio, dentre outros, da construção de edifícios, vias de circulação e estacionamentos. Mesmo a água infiltrada tem, muitas vezes, sua trajetória natural alterada pela introdução de obras subterrâneas, como túneis e subsolos. Essas intervenções no meio físico, no entanto, podem se dar de modo mais ou menos danoso ao meio ambiente, perturbando em maior ou menor intensidade o equilíbrio ambiental, favorecendo ou comprometendo o desenvolvimento sustentável, respeitando ou desrespeitando as diretrizes de ocupação e uso do solo. Apesar das várias alternativas sempre presentes, não existem dois caminhos a serem ao mesmo tempo trilhados, pois, sendo a engenharia satisfativa, tornar-se-ia incoerente satisfazer as demandas da sociedade gerando-lhe problemas como os ambientais. Isso torna necessária uma atuação planejada e preventiva por parte da engenharia.

É fato indiscutível que as intervenções de engenharia por meio da construção de edificações, calçadas, ruas, avenidas, estacionamentos etc., afetam a capacidade de infiltração natural. Mas a atuação da engenharia antecede, ou pelo menos deveria anteceder, todas essas intervenções, ao participar planejando e projetando como deverão se dar. Devem ser analisadas, por exemplo, quais as áreas passíveis de ocupação e que taxas de aproveitamento devem ser adotadas. Já nesse primeiro momento é importante destacar a relevância de áreas do conhecimento como arquitetura, geografia, geologia e antropologia, para, atuando de modo transdisciplinar, conjuntamente com a engenharia, equacionar os problemas socioambientais previstos.

Indo para o plano da execução, o projeto e a construção de uma edificação, calçada, rua, dentre outras obras, ao intervirem reduzindo a infiltração natural, devem buscar adotar medidas compensatórias, de modo a reduzir o impacto ambiental. A título de exemplo, as edificações residenciais, comerciais e industriais poderão prever o uso das águas pluviais em

algumas de suas atividades e mesmo para consumo quando devidamente tratada. Para o volume de água excedente, quando tecnicamente viável, deve-se, nesses casos, buscar implantar sistemas de infiltração compensatórios. A questão econômica deve ser analisada levando-se em conta o passivo ambiental oriundo da não implantação dos sistemas compensatórios. Como geralmente o meio urbano é, ou deveria ser, dotado de sistemas de drenagem de águas pluviais públicos, pois sempre existirá um excedente a ser drenado, a tendência é que a população dele se sirva sem recorrer aos sistemas compensatórios. Com isso, a regulação da implantação de sistemas compensatórios de infiltração deve ser de competência da administração pública, que deve agir informando, educando, estabelecendo normas e dando-lhes efetividade, de modo a viabilizar o seu uso quando recomendado.

Ainda exemplificando, a implantação de estacionamentos e vias de circulação, como calçadas, ruas e avenidas, pode ser concebida como autonoma, como ilustrado no capítulo 30, ela própria propiciando a completa infiltração das águas pluviais, sem a necessidade de sistemas compensatórios adicionais. Quando estes se fizerem necessários, como no caso das edificações, poderão ser utilizados os sistemas de drenagem compensatórios apresentados nos capítulos 17, 18 e 19 deste livro, que tratam, respectivamente, de colchões drenantes, trincheiras e poços.

Cabe destacar que, assim como a impermeabilização da superfície do solo é susceptível de gerar problemas socioambientais, os sistemas de drenagem compensatórios podem também, se mal concebidos, gerarem graves problemas ambientais, como subsidências e erosões internas.

Embora constitua tema que merece ser melhor estudado, a implantação de obras subterrâneas como túneis e subsolos impactam a condição de infiltração das águas pluviais e podem afetar as próprias obras de engenharia ao intervirem na trajetória natural e capacidade de fluxo do maciço. Esse tema merece evidentemente análise mais ampla, levando-se em conta a geologia estrutural e a hidrogeologia. Contudo, não é difícil perceber que, com a intervenção da obra subterrânea no fluxo do lençol freático, quando for este o caso, a umidade do maciço será ampliada e, por conseguinte, a sucção atuante no solo reduzida, alterando, assim, a taxa de infiltração. Outro aspecto relevante é que a redução da sucção aliada a eventuais alterações das tensões efetivas poderão afetar a capacidade de suporte do solo, gerando problemas que fogem ao escopo deste capítulo.

Até aqui, basicamente, mostrou-se, com poucas exceções, a importância de se manter a infiltração natural ou se promoverem infiltrações compensatórias de modo a manter o equilíbrio ambiental e propiciar o desenvolvimento sustentável. No entanto, é preciso que a engenharia mantenha o olhar vigilante quanto aos riscos que oferece a infiltração em certos solos e em certas situações geomorfológicas. Alguns solos, como os solos tropicais colapsíveis, são geralmente muito sensíveis a variações de umidade que extrapolem os limites naturais. Igualmente a infiltração em solos expansivos pode ser muito danosa para a própria obra de engenharia. Mas talvez o mais relevante aqui seja alertar para o risco da infiltração das águas pluviais em áreas geomorfologicamente desfavoráveis, como é o caso das encostas. Essas infiltrações, além de poderem alterar o nível do lençol freático, quando presente, promovem a redução da sucção atuante no solo e, por consequência, quase sempre, a sua resistência ao cisalhamento. Em todas essas situações, a infiltração de águas servidas é ainda mais danosa devido também à sua ação química.

Além desses problemas de curto prazo, cabe destacar que a infiltração das águas pluviais em condições não naturais nas encostas, devido à condição de fluxo favorável em meio tanto saturado como não saturado, podem gerar, a médio e longo prazo, a esqueletização do maciço por meio do fenômeno da eluviação. Lima (2003) mostrou que a alteração do maciço em condições favoráveis de fluxo afeta a sua estabilidade.

Em síntese, este item mostra que a engenharia assume papel de grande relevância na preservação da capacidade de infiltração do solo, mitigando problemas socioambientais como erosões, inundações e rupturas de encostas. Deve, ao mesmo tempo, atuar de modo cuidadoso no caso de implantação de sistemas compensatórios de drenagem e na execução de obras de superfície e de subsuperfície.

5 O direito e a infiltração

Em um primeiro olhar, pode parecer pretensioso associar o Direito à questão da infiltração. No entanto, olhando-o como elemento regulador e pacificador que é, torna-se clara a importância da associação que se pretende explanar aqui. É evidente que não se buscará exaurir aspectos relativos à legislação ambiental relacionados à questão da infiltração; apenas serão abordados alguns pontos em caráter ilustrativo. Camapum de Carvalho (2009a), discute de modo mais amplo os "aspectos técnicos, jurídicos e educacionais e a expansão urbana ambientalmente sustentável".

5.1 Repartição de competências em matéria ambiental e efetividade das leis

No que tange aos aspectos constitucionais concernentes ao Direito Ambiental, cabe inicialmente abordar, mesmo que brevemente, a questão da repartição de competências em matéria ambiental.

O artigo 24 da Constituição Federal (CF) fixa a maior parte das competências para legislar em matéria ambiental, estabelecendo-as como concorrentes entre a União, os Estados e o Distrito Federal. No âmbito das competências legislativas concorrentes, a União deve legislar sobre questões gerais, principiológicas; os Estados e o Distrito Federal podem editar normas específicas de caráter suplementar, restringindo-se a estes apenas a edição de leis gerais no caso de inexistência de leis federais (LEUZINGER e CUREAU 2008). As leis estaduais e distritais devem buscar complementar ou suplementar a legislação federal, no sentido de atender a peculiaridades regionais.

Já os municípios, apesar de o art. 24 da CF não os incluir no rol dos entes competentes para legislar concorrentemente em matéria ambiental, os incisos I e II do art. 30 do mesmo diploma confere-lhes competência para legislar, respectivamente, sobre matéria de interesse local e de modo a suplementar a legislação federal e a estadual, no que couber. Sendo assim, o município pode exercer a competência para legislar sobre os temas fixados no art. 24 da CF, desde que o assunto seja de interesse local e não contrarie a legislação federal e estadual. Leuzinger e Cureau (2008) pontuam que, em questões ambientais, deve prevalecer a norma que melhor defenda o direito fundamental tutelado, por se tratar de preceito constitucional que se impõe à ordem jurídica federal e regional.

A competência material corresponde aos poderes atribuídos pela CF/88 aos executivos federal, estaduais e municipais, nos termos dos artigos 21, 23 e 30, incisos III a IX. No que diz respeito às competências materiais ambientais, a maior parte é classificada como comum, no âmbito do art. 23, o que significa que os poderes executivos dos três níveis deverão, conjuntamente, atuar no sentido de "proteger e preservar o meio ambiente para as presentes e para as futuras gerações".

Diante dos inúmeros e frequentes desastres socioambientais por que tem passado a sociedade brasileira, foi editada em 10 de abril de 2012 a Lei 12.608 instituindo a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), que dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC), autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e altera as Leis nºs 12.340/2010, 10.257/2001, 6.766/79, 8.239/91 e 9.394/96. O artigo 2º da Lei 12.608 estabelece as competências materiais direcionadas para a redução dos riscos de desastres, saindo da órbita pura do Estado para contemplar, em seu parágrafo 1º, a colaboração de entidades públicas ou privadas e da sociedade em geral, conforme apresentado a seguir:

> Art. 2º É dever da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios adotar as medidas necessárias à redução dos riscos de desastre.
> § 1º As medidas previstas no caput poderão ser adotadas com a colaboração de entidades públicas ou privadas e da sociedade em geral.

O poder de polícia é espécie do poder administrativo e inerente às três esferas políticas: federal, estadual e municipal. Esse poder deve ser usado nas questões ambientais para condicionar o uso de bens, o gozo de direitos e o exercício de atividades, de modo a manter a preservação ambiental, aplicando as sanções pertinentes nos casos de violação às normas (LEUZINGER e CUREAU, 2008, p. 42). Segundo Camapum de Carvalho (2009a), a necessidade do exercício desse poder de polícia é, em geral, diretamente proporcional à deficiência na educação, aí incluída a oriunda da escassez de informação. Segundo Camapum de Carvalho (2009a, p. 39-40),

> Sobre a discussão a respeito das competências materiais comuns a União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos municípios e daquelas exclusivas dos municípios, talvez o melhor fosse abordá-las com foco na prioridade hierárquica do agir, pois é sabido que, enquanto são passíveis de ocorrerem exaustivas discussões de competência no Judiciário, danos ambientais irreparáveis são suscetíveis de acontecerem. Seria importante colocar aqui o mesmo espírito da subsidiariedade aplicável ao órgão de gestão competente apresentado por Leuzinger e Cureau (2008, p. 43), ao discutir a competência comum ambiental, ou seja, mesmo em questões exclusivas, não agindo o município, agiriam os Estados e, na omissão destes, a União. Levando o trato do meio ambiente enquanto direito material para o campo do espaço geográfico, o entendimento colocado é perfeitamente plausível, pois se o município não agiu, como o seu território inclui-se no do Estado, esse teria interesse de agir e, caso esse não agisse, estando ele compreendido no espaço federal, caberia à União o interesse de agir. Esse raciocínio deve, quando se tratar de meio ambiente, ser estendido para a esfera do direito internacional, no caso de omissão dos Estados, pois o meio ambiente constitui, acima de tudo, um patrimônio pertencente à humanidade como um todo e

> poder-se-ia ainda dizer, não só a ela, como também às demais espécies vivas. Veja que globalmente esse parece ser, nas entrelinhas, o entendimento de Pontes de Miranda (1987, p. 376) ao discutir a questão do tombamento.

Saindo do campo jurídico para penetrar no das normas técnicas, uma vez que a engenharia deve, em princípio, a elas se submeter, mesmo que em caráter voluntário, cabe aqui apresentar um breve esboço sobre as competências, lembrando que vale a pena conhecer a definição aportada no acordo sobre Barreiras Técnicas da Organização Mundial do Comércio (OMC) e constante do Anexo da Resolução n.º 6, de 02 de dezembro de 2002 do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO)[1].

A edição de normas técnicas é de competência da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Resolução 7 de 24/08/1992 do CONMETRO); porém, como se trata de normas voluntárias, é comum, no campo da engenharia, serem também editadas por órgãos públicos e mesmo por empresas privadas. Acima das normas técnicas estão os regulamentos técnicos, que são obrigatórios e estabelecem requisitos técnicos, seja diretamente, seja pela referência ou incorporação do conteúdo de uma norma, de uma especificação técnica ou de um código de prática[2].

Com maior interesse para a ocupação e o desenvolvimento urbano, tem-se o Código de Obras ou Código de Edificações municipal, pois, além de disciplinar aspectos técnicos gerais relativos às construções e ocupação do solo como unidade individual, esse Código pode vincular normas técnicas de interesse regional e ambiental, retirando destas o seu caráter voluntário.

Outro ponto relevante que, por vezes, guarda relação com a questão da competência é o da falta de efetividade das leis e as lacunas nelas existentes. Segundo Camapum de Carvalho (2009a), ao se discutir a efetividade das leis, faz-se necessário considerar aspectos como hierarquia, abrangência e aplicabilidade ao caso concreto. Em se tratando de política urbana e de meio ambiente, a linha mestra principiológica encontra-se plantada na Constituição Federal e reina suprema, quando a discussão se situa no plano da hierarquia. Portanto, segundo esse autor, não pode nem deve qualquer lei geral ou especial ter a pretensão de contrariar os comandos constitucionais.

5.2 Aspectos constitucionais

Cabe inicialmente enfatizar a relativamente recente mudança de postura mundial ao se incluir o tema meio ambiente nas constituições como um direito fundamental, direito de

1 Conforme o CONMETRO, no Anexo da Resolução n.º 06 de 02/12/2002, em nota do item 3.5, norma é: "Documento aprovado por uma instituição reconhecida, que fornece, para uso comum e repetitivo, regras, diretrizes ou características para os produtos ou os processos e métodos de produção relacionados e cuja observância não é obrigatória. Também pode incluir prescrições em matéria de terminologia, símbolos, embalagem, marcação ou rotulagem aplicáveis a um produto, processo ou método de produção, ou tratar exclusivamente delas".

2 Conforme o CONMETRO, no Anexo da Resolução n.º 06 de 02/12/2002, no Item 3.7, Regulamento é "Documento que contém regras de caráter obrigatório e que é adotado por uma autoridade"; no Item 3.8, Regulamento Técnico é "Regulamento que estabelece requisitos técnicos, seja diretamente, seja pela referência ou incorporação do conteúdo de uma norma, de uma especificação técnica ou de um código de prática".

terceira geração, em lugar das práticas anteriores que consistiam na sua inclusão como simples atribuições do Poder Público (SILVA, 2007). Salienta-se que, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, realizada em Estocolmo em 1972, pela primeira vez o meio ambiente foi formalmente declarado como direito fundamental. Segundo Leuzinger e Cureau (2008), os direitos fundamentais de terceira geração, como é o caso do direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, desdobramento do direito à vida, afastam-se da ideia tradicional de Direito Subjetivo, que requer a individualização de um titular, para colocar em destaque os Direitos Difusos, os quais têm por característica a transindividualidade (CAMAPUM DE CARVALHO, 2009b).

No Brasil, até a Constituição Federal de 1988, o tema proteção ao meio ambiente natural era tratado apenas de modo reflexo, inserido dentro de outros assuntos. No entanto, a Constituição de 1988, considerada eminentemente ambientalista, passou a tratar o tema de modo amplo e moderno (SILVA, 2007). Além da proteção específica conferida ao meio ambiente, a Constituição Federal de 1988 repartiu entre o Estado e a sociedade o dever de protegê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações nos termos do seu artigo 225. A função ambiental do Estado encontra-se dividida entre os três poderes (Legislativo, Judiciário e Executivo); a da coletividade tem caráter bem mais amplo, indo do simples respeito às normas à exigência de condutas por parte dos particulares em consonância com a defesa e preservação do meio ambiente (LEUZINGER e CUREAU, 2008).

Destaca-se que a Constituição Federal de 1988 promoveu a recepção da Lei nº 6.938/81 em quase todos os seus aspectos. Além disso, Fiorillo (2011, p. 81) considera que, ao utilizar a expressão "ecologicamente equilibrado", ela passa a exigir "harmonia em todos os aspectos facetários que compõem o meio ambiente".

Camapum de Carvalho (2009a) argumenta que a Constituição Federal Brasileira, ao fixar, no inciso XXIII do art. 5º, que "a propriedade atenderá a sua função social", limita o alcance do direito civil como regulador da propriedade, restringindo-o apenas às relações civis a ela pertinentes, nos termos dos artigos 1228 e 1231 do Código Civil Brasileiro (CCB). Aqui surge um aparente choque entre o direito à propriedade e o direito de todos ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, o qual situa a propriedade no campo do respeito à sua função social. Nesse aparente choque, faz-se necessário entender que a propriedade já não confere o direito absoluto de usar, gozar e dispor sem limites, em qualquer circunstância, passando a atender às necessidades e aos interesses coletivos com o objetivo de cumprir sua função social. É necessário entender que, com isso, a propriedade não perde em absoluto o seu caráter de direito fundamental; tem-se que, no confronto de normas de mesma hierarquia, deve-se, observado o princípio da proporcionalidade, proteger o bem maior (no caso a propriedade em sua função social) e, por via reflexa, o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado (CAMAPUM DE CARVALHO, 2009a).

Para Lemos (2008), propriedade não é um direito, e direito de propriedade é o direito à proteção da relação entre sujeito e objeto, requerendo, assim, preencher certos requisitos fixados pelo direito. Nesse sentido, faz-se necessário que ela cumpra a sua função social e não perturbe o equilíbrio ambiental. O próprio parágrafo primeiro do artigo 1228 do Código Civil fixa limitações ainda mais amplas:

> § 1º O direito de propriedade deve ser exercido em consonância com as suas finalidades econômicas e sociais e de modo que sejam preservados, de conformidade

> com o estabelecido em lei especial, a flora, a fauna, as belezas naturais, o equilíbrio ecológico e o patrimônio histórico e artístico, bem como evitada a poluição do ar e das águas.

Portanto, o exercício do direito de propriedade requer a observação dos limites fixados em leis especiais e na própria Constituição Federal, que prevê o direito de todos a um meio ambiente ecologicamente equilibrado. Destaca-se, ainda, que o parágrafo 3º do mesmo artigo prevê que o proprietário pode ser privado da coisa em caso de perigo público iminente.

5.3 Princípios de Direito Ambiental

Fiorillo (2011) classifica os princípios de Direito Ambiental em princípios da Política Global do Meio Ambiente, que são, segundo ele, princípios oriundos da Conferência de Estocolmo de 1972, genéricos e diretores, aplicáveis à proteção do meio ambiente, e princípios da Política Nacional do Meio Ambiente, que correspondem à implementação dos princípios globais de modo adaptado à realidade cultural e social de cada país. Considerando as dimensões do Brasil, suas diferenças físicas, suas nuances socioculturais e o modo como a competência legislativa foi configurada na Carta Magna de 1988, conferindo aos municípios competências complementares e suplementares, tem-se que esta adaptação pode se dar em relação às realidades mais gerais referentes ao país como um todo ou atingir especificidades como as que marcam determinado estado ou mesmo cidade.

Poder-se-ia ainda, sob o ponto de vista da engenharia, subdividir os princípios em filosóficos e aplicados. Os princípios filosóficos, ainda que plantados na Constituição Federal ou na legislação infraconstitucional, voltam-se para conceitos e normas de conduta gerais, enquanto os aplicados correspondem a uma ação.

Como primeiro princípio filosófico, cabe destacar o do desenvolvimento sustentável que surgiu na Conferência Mundial de Meio Ambiente, realizada em 1972, em Estocolmo, e que se encontra implícito no artigo 225 da Constituição Federal de 1988 a seguir:

> Art. 225. **Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado**, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade **o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações**. (Grifou-se)

Ao estabelecer o direito de todos ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e fixar o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações, a Carta de 1988 adotou o princípio do desenvolvimento sustentável para garantir a base de produção e reprodução do homem. Mas é possível ir além nesta interpretação, pois se o legislador se referiu a todos no que tange ao direito e restringiu os deveres ao Poder Público e à coletividade, esse todo há de ser visto como muito mais abrangente, extrapolando o ser humano para atingir a fauna e a flora e, por que não dizer, a própria natureza em sentido amplo. Portanto, como bem pontua Fiorillo (2011), o conceito de desenvolvimento oriundo do Estado de concepção liberal já não encontra abrigo na sociedade moderna. Apesar de peculiaridades que surgem necessariamente em legislações espacialmente mais específicas, como as municipais, com o objetivo de atender as necessidades econômicas e socioculturais locais, o princípio do desenvolvimento

sustentável deve ser aplicado ao todo, tanto no meio rural como no urbano, pela sociedade e por cada um, não só pela empresa de engenharia, mas também pelo engenheiro e demais operários que atuam em um projeto.

Um primeiro olhar voltado para o que se acaba de colocar pode conduzir a que se vislumbre uma afronta à ordem econômica fundada na livre iniciativa; porém, não é difícil perceber que os recursos naturais são exauríveis e, como tais, requerem cuidados especiais. Nesse sentido, para que não pairassem dúvidas, sabiamente a Constituição Federal de 1988 estabeleceu, em seu artigo 170, que a ordem econômica deve regrar-se pelos ditames da justiça social (*caput*), respeitando, dentre outros, o princípio da defesa do meio ambiente (inciso VI).

Além desses princípios gerais aplicados a todos e, como tais, norteadores da prática da engenharia, dá-se aqui destaque a alguns princípios de cunho diretamente a ela aplicados: princípio da prevenção, princípio da precaução, princípio do poluidor-pagador e princípio da reparação.

Antes de tratar desses princípios, cabe, entretanto, destacar que, na engenharia, os princípios de Direito Ambiental são aplicados segundo o risco. Camapum de Carvalho (2011, p. 7) sugere que:

> "o risco do dano deve ser visto em três níveis, o dano sobre o qual não se tem dúvida, e deve ser evitado; o risco onde o dano é provável e deve ser estudado antes de colocada em prática a atividade, concretizando-se o potencial de risco a ação deve ser evitada; e finalmente, o dano incerto, em que uma vez vislumbrado o seu potencial de ocorrência, deve ser criteriosamente analisado antes de qualquer iniciativa. Na prática da engenharia embora os riscos possam ser minimizados eles não podem ser excluídos, pois sempre permanece a probabilidade de um dano menor".

Dentre os citados princípios aplicados, para a engenharia, em especial no tocante à infiltração que pode operar como solução e como causa de problemas ambientais, assume imensa importância o princípio da prevenção, uma vez que, por meio dele, é possível evitar o dano ambiental antevisto. Não é difícil perceber que, em uma construção rodoviária, por exemplo, a inexistência ou o lançamento inapropriado dos sistemas de drenagem, assim como a falta de proteção dos taludes, induzirá a danos ambientais, como os de erosão, e por consequência, os de assoreamento de cursos d'água e reservatórios; preventivamente, podem ser implantados sistemas de infiltração compensatórios. Logo, esse é um caso em que se deve aplicar o princípio da prevenção, pois se conhece o dano potencial que pode ser evitado. Embora o projeto de engenharia já deva contemplá-lo, não o fazendo, deve a execução adotá-lo.

A infiltração, no entanto, projetada ou não, requer cuidados em relação a problemas que podem dela se originar, como é o caso da erosão interna, da esqueletização do maciço, das rupturas de encosta, da ocorrência de subsidências, dentre outros. Exemplifica-se aqui com o caso relatado por Camapum de Carvalho *et al.* (1999). Em uma antiga cascalheira localizada próximo à cidade satélite Recanto das Emas, no Distrito Federal, ao passar a atuar após o término de sua exploração como bacia de retenção e infiltração, deu origem, por meio de um processo de erosão interna, à importante subsidência quando da execução das obras de implantação das lagoas de estabilização para tratamento de esgoto daquela localidade. Esse é um caso interessante, pois a solução adotada para promover a infiltração das águas pluviais,

na busca de se evitarem problemas de erosão com formação de sulcos, ravinas e voçorocas, deu origem, por meio da infiltração localizada, a um processo de erosão interna que surgiu por não ser a matriz grossa do material natural filtro da matriz fina. Nesse caso, a análise dos critérios de filtro, pouco usual enquanto verificadora do próprio material, acoplada ao fato de que a área situava-se próxima ao bordo de chapada, portanto, em condições favoráveis de fluxo com gradientes hidráulicos elevados, teriam conduzido a preventivamente não adotar o fundo de jazida como área de infiltração concentrada.

Muitas vezes, no entanto, o princípio da prevenção não é na prática aplicado na engenharia, por simples deficiência na educação, pois os engenheiros, de um modo geral, são formados focando a atenção no ponto, no problema específico a resolver naquele momento, quando o ideal seria serem formados também com uma percepção dos reflexos do projeto e, por consequência, da própria obra ao longo do tempo, no todo, para o meio ambiente, para a sociedade e para a qualidade de vida.

O princípio da precaução, por sua vez, corresponde à situação em que se tem conhecimento de que o risco existe, mas não é perfeitamente conhecido, devendo-se por precaução evitar a prática passível de provocar dano. É evidente que esse princípio não deve se prestar a imobilizar as atividades humanas (MACHADO, 2007), em especial as de engenharia, pois nestas sempre existe algum risco. A sua aplicação deve ser vista como um mecanismo que visa assegurar a qualidade de vida das gerações e a preservação do equilíbrio ambiental e que geralmente confere maior segurança à própria obra.

No momento atual, a escassez de material de construção aliada à necessidade de se dar fim a resíduos urbanos e industriais tem conduzido à adoção de alternativas de engenharia que buscam, ao mesmo tempo, suprir suas necessidades e solucionar ou evitar problemas ambientais. Muitos desses casos constituem situações em que a aplicação do princípio da precaução é recomendável. Por exemplo, a incorporação de micro-organismos – frisa-se bem incorporação – para melhoria das propriedades ou do comportamento de um solo, não sendo conhecido o impacto desses micro-organismos no meio ambiente local, deve, por precaução, ser evitada até que se conheçam os seus reflexos ambientais.

Outro exemplo diz respeito à prática muitas vezes adotada pela engenharia de se recuperarem áreas degradas por ravinas e voçorocas reaterrando a erosão com resíduos de construção e demolição (RCD). Tal prática, em determinadas situações, não oferecem riscos; em outras, no entanto, não só podem oferecer riscos, como parte deles pode ser desconhecida. Por exemplo, se a água da chuva ou mesmo do lençol freático, ao percolar através do RCD tiver seu pH alterado, qual o impacto deste fluido percolado na estabilidade estrutural daquele solo de contenção ou na biota ali existente? Sabe-se que o risco existe, mas desconhecendo-se o dano ou o nível do dano, deve-se por precaução evitar a prática. Apesar de tudo, na engenharia, é preciso pensar o princípio da precaução de modo flexível, mas responsável, pois existem danos a serem mitigados. Existem também aqueles a serem evitados a qualquer custo, lembrando que nem a engenharia nem o meio ambiente se enquadram como ciências exatas em absoluto. Segundo Camapum de Carvalho (2011, p. 27),

> A administração pública, por sua vez, diante da nova realidade do desenvolvimento econômico e social do País, os novos costumes, as novas demandas e condições de uso do solo, ao perceber a insuficiência das normas existentes e a incapacidade da engenharia equacionar os novos problemas deve fixar padrões de precaução mais exigen-

> tes e buscar impulsionar as investigações e o avanço tecnológico de modo a garantir o desenvolvimento sustentável capaz de manter o equilíbrio ambiental. Destaca-se, porém, que o risco para a vida, para a qualidade de vida e para o meio ambiente imposto por atividades de engenharia de modo específico, não deve ser objeto de zelo restrito ao Poder Público, se não dela mesma engenharia, sob pena de ver castrada sua própria engenhosidade construtiva e criativa.

Nesse sentido, a Lei 12.608/2012 que trata, dentre outros, da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, ao estabelecer no § 2º do artigo 2º que a "incerteza quanto ao risco de desastre não constituirá óbice para a adoção das medidas preventivas e mitigadoras da situação de risco", fixou em Lei a aplicação do princípio da precaução nas situações de risco.

Do exposto, sobressai a importância do princípio da precaução para a engenharia.

Um princípio que vem assumindo força atualmente pelo seu poder regulador enquanto instrumento de responsabilização é o princípio do "poluidor-pagador". Camapum de Carvalho (2009b) faz uma análise bastante completa sobre o tema.

Esse princípio impacta a engenharia enquanto instrumento de responsabilização, ou seja, desprezada ou minimizada a importância dos dois princípios anteriores, a engenharia torna-se responsável pelos danos ambientais oriundos de sua prática.

A título de exemplo, a execução de uma obra sem que se tomem os devidos cuidados para evitar erosão e carreamento de sedimentos para cursos d'água e reservatórios, torna a empresa e o engenheiro responsáveis passíveis de responderem solidariamente pelos eventuais danos gerados a jusante. Outro exemplo diz respeito à permissão pelo Poder Público e execução pela engenharia de sistemas de esgoto constituídos de fossa e sumidouro em encostas. O efeito do aumento de umidade na sucção atuante no solo e, consequentemente, em sua resistência e na estabilidade do talude é perfeitamente conhecido da engenharia; se previamente verificado por meio de cálculos o elevado potencial de risco, a prática deve ser evitada. Mas ela deve ainda ser evitada por precaução, até que se conheça, para aquela área, a influência da química daquele esgoto na estabilidade estrutural do solo. Nesse caso, o Poder Público e o engenheiro e/ou empresa de engenharia, como poluidores indiretos, deverão ser responsabilizados por força desse princípio, caso a encosta venha a se romper tendo por causa dessa instabilização estrutural.

Ainda exemplificando, pela importância que assumiram as rupturas de encostas enquanto geradoras de catástrofes decorrentes de eventos naturais, cita-se a prática agropecuária nas encostas ou em áreas planas do seu topo como elementos desencadeadores de processos de ruptura. Tais práticas, ao propiciarem a infiltração de compostos químicos oriundos dos insumos agrícolas, solubilizados ou não, não suscetíveis de provocarem a instabilização da encosta por meio do enfraquecimento da estrutura do solo. Esse é um efeito ainda pouco estudado e, como tal, devem aqui as engenharias voltadas para atuação no meio rural e os próprios ruralistas aplicarem o princípio da precaução, sob pena de serem responsabilizados como poluidores indiretos.

Em síntese, esse princípio busca a valoração econômica dos recursos naturais, dos seus usos e dos danos que surgem em função da ação humana, de modo que por eles paguem, mesmo os poluidores indiretos.

Finalmente, apresenta-se, no escopo deste capítulo, o princípio da reparação. Esse princípio está atrelado ao anterior e tem fundo na inobservância dos princípios da prevenção e da

precaução. Não agindo com prevenção e/ou precaução, a engenharia torna-se, por força do princípio do poluidor-pagador, obrigada a reparar o dano direta ou indiretamente oriundo de sua prática.

Embora os problemas elencados como exemplos e muitos outros possam estar relacionados a deficiências na educação, esta breve exposição mostra a necessidade de a engenharia atuar observando os princípios de direito ambiental a ela aplicados.

5.4 Responsabilidade por danos ao meio ambiente

O direito brasileiro, buscando assegurar uma adequada tutela jurídica ao meio ambiente, adota a responsabilidade civil por dano ambiental na modalidade objetiva, ou seja, aquele que gera o dano ambiental será responsabilizado independentemente do elemento subjetivo da ação, não dependendo, assim, de culpa ou dolo. Com isso, basta que estejam presentes, no caso concreto, a ocorrência de um dano ao meio ambiente e o nexo de causalidade entre o dano e a conduta de determinado agente, excepcionando a comprovação de caso fortuito ou força maior, que implicam ausência de nexo de causalidade e são admitidas, segundo a ótica da Teoria do Risco Criado, como excludentes de responsabilidade (CAMAPUM DE CARVALHO, 2009b). Vitta (2008) entende que, ao se aplicar a Teoria da Responsabilidade Objetiva, ocorre a presunção de que o agente causou o dano, invertendo-se o ônus da prova e cabendo então ao próprio réu tentar excluir sua responsabilidade.

Na responsabilidade por danos ambientais, a Constituição Federal não faz distinção entre as pessoas físicas e jurídicas indo, no caso da prática da engenharia, da pessoa do engenheiro às empresas projetistas, executoras e fiscalizadoras do empreendimento. Segundo o parágrafo 3º do artigo 225 da Constituição Federal apresentado a seguir, além de reparar os danos causados ao meio ambiente, os infratores se sujeitam a sanções penais e administrativas.

> § 3º - As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados.

No tocante à responsabilidade civil por dano ao meio ambiente, assume grande relevância o conceito de poluidor. Segundo Camapum de Carvalho (2009b), Benjamin leciona que o termo "poluidor" passa a ser um vocábulo amplo, incluindo

> aqueles que diretamente causam o dano ambiental (o fazendeiro, o madeireiro, o minerador, o especulador), bem como os que indiretamente com ele contribuem, facilitando ou viabilizando a ocorrência do prejuízo (o banco, **o órgão público licenciador, o engenheiro, o arquiteto, o incorporador**, o corretor, o transportador, dentre outros). (Grifou-se)

Portanto, dentro desse entendimento, em atenção ao princípio do poluidor-pagador e à adoção do regime de responsabilidade civil ambiental objetiva, tanto o poluidor direto como o indireto respondem solidariamente na obrigação de reparar o dano ambiental causado. A título de exemplo, uma encosta que se rompeu devido a infiltração de água proveniente de fossa e sumidouro de uma edificação nela implantados atendendo a um projeto de enge-

nharia, construídos sob a supervisão de um engenheiro e gozando do aval liberatório da administração pública, apesar de ter como poluidores diretos os usuários da edificação, serão também responsabilizados pelo dano ao meio ambiente na qualidade de poluidores indiretos, o projetista, o engenheiro e/ou empresa construtora e a Administração Pública.

Nesse sentido, a própria Lei nº 6.938/81 que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente define o termo "poluição" no inciso III do artigo 3º como sendo "a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente"

a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;

c) afetem desfavoravelmente a biota;

d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;

e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos;

Uma leitura atenta dessas alíneas coloca em evidência que as atividades de engenharia são potencialmente poluidoras, requerendo formação apropriada e cuidados especiais do engenheiro no exercício da profissão e das empresas atuantes na área. O inciso IV da mesma Lei, ao definir o termo poluidor, confirma esse entendimento:

> IV – poluidor, a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, direta ou indiretamente, por atividade causadora de degradação ambiental; (...)

Além das responsabilidades civis definidas na Lei nº 6.938/81, cabe destaque a responsabilidade penal constante do artigo 15 do mesmo diploma, segundo alteração realizada pela Lei nº 7.804/89:

> Art. 15. O poluidor que expuser a perigo a incolumidade humana, animal ou vegetal, ou estiver tornando mais grave situação de perigo existente, fica sujeito à pena de reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos e multa de 100 (cem) a 1.000 (mil) MVR.
> § 1º A pena é aumentada até o dobro se:
> I - resultar:
> a) dano irreversível à fauna, à flora e ao meio ambiente;
> b) lesão corporal grave;
> (...)

Temporalmente, a responsabilidade civil no campo da proteção e preservação do meio ambiente pode, com fundamento na responsabilidade objetiva, dividir-se em *ex ante* e *ex post*, ou seja, em responsabilidade, respectivamente, pelo dano ou risco de dano futuro e pelo dano já ocorrido (FERREIRA e SILVA, 2007). Observa-se que, embora nos dois casos a responsabilidade tenha cunho objetivo, no primeiro, o *ex ante*, sobressai a aplicação dos princípios da precaução e da prevenção, com base nos quais a engenharia deve atuar evitando ou mitigando o dano, enquanto no segundo, *ex post*, tornam-se aplicáveis os princípios da reparação e do poluidor-pagador, e a engenharia passa a assumir, então, reponsabilidade pelos danos a que direta ou indiretamente deu origem. Quanto ao tempo do dano ambiental em si, como bem entende Steigleder (2004), é o longo prazo que define as modificações ecológicas, as reações químicas, as ações biológicas, não sendo muitas vezes o dano *ex post* imediatamente aparente. Com isso, torna-se, muitas vezes, difícil a fixação do nexo de causalidade, o que pode inviabilizar a responsabilização do agente do dano e requerer a necessidade de se redefinir o tempo do dano.

Considerando-se que a Engenharia se pretende exata e o Direito o julgamento com fundamento em fato concreto, torna-se indispensável à atuação de outros ramos da ciência, como a química e a biologia, no sentido de buscar elucidar muitos dos danos ambientais oriundos da intervenção da Engenharia e de outros agentes no meio ambiente. Essa atuação de outros ramos da ciência certamente contribuirá para maior valorização prática dos princípios da prevenção e da precaução.

Um exemplo dessa percepção de longo prazo, no qual o dano ambiental gerou impacto direto na saúde humana, mas só foi percebido depois de muito tempo, diz respeito ao uso do amianto em materiais de construção, desde telhas e caixas d'água, usadas por muito tempo no Brasil, até a incorporação do amianto a misturas betuminosas, usadas até pouco tempo em países como o Canadá. Logo, tanto a Engenharia como o Direito devem, no que diz respeito ao meio ambiente, reverem os seus conceitos considerando a dinâmica dos ecossistemas no tempo, sendo necessário discutir a questão da responsabilização sem o dano ainda concreto, apenas com base em previsões científicas fundadas em outras ciências. Isso torna a Engenharia ainda mais complexa e relevante, obrigando a maiores reflexões e soluções engenhosas, porém, seguras do ponto de vista ambiental.

Nesse sentido, vale reportar o parágrafo único do artigo 927 do Código Civil Brasileiro, que pontua:

> Parágrafo único. Haverá obrigação de reparar o dano, independentemente de culpa, nos casos especificados em lei, ou **quando a atividade normalmente desenvolvida pelo autor do dano implicar, por sua natureza**, risco para os direitos de outrem. (Grifou-se)

Essa é a situação imposta pela atividade de engenharia ao atuar impermeabilizando indiscriminadamente a superfície do solo, muitas vezes sem quaisquer ações preventivas mitigadoras, ou ainda, quando estas são adotadas por meio da implantação de sistemas de drenagem convencionais ou de infiltrações localizadas sem que se avalie o seu potencial de riscos socioambientais, tais como inundações, erosões e subsidências.

Nesses casos, muitas vezes não se consegue definir claramente o dano futuro; no entanto, é possível, mediante análise criteriosa, situá-lo como dano potencial. O mecanismo de responsabilidade em casos como esses deve ser a adoção de medidas de prevenção e precaução respectivamente, quando é possível prever o dano futuro e quando se está diante da ausência de certeza científica absoluta, o que remete para a avaliação com base em critérios de probabilidade (STEIGLEDER, 2009).

Discutiu-se aqui a responsabilidade civil atinente a pessoas físicas e jurídicas, mas cabe salientar que o artigo 70 da Lei 9605/98 trata ainda da responsabilidade por infração administrativa ambiental. Esse artigo considera infração administrativa ambiental toda ação ou omissão que viole as regras jurídicas de uso, gozo, promoção, proteção e recuperação do meio ambiente. Seu parágrafo 2º pontua que qualquer pessoa, ao constatar infração ambiental, poderá dirigir representação às autoridades competentes para efeito do exercício do seu poder de polícia.

Milaré e Loures (2004) indicam que as sanções administrativas pelo seu caráter repressivo e por isso pessoal podem alcançar apenas aquele que efetivamente tenha praticado ou concorrido para o ato infracional. Isso torna também passível de responsabilização por dano ao meio ambiente o funcionário público.

6 Considerações finais

Os exemplos e as discussões apresentadas ao longo deste capítulo não devem ser vistos como intimidadores, tampouco como restritivos, mas sim como um indicativo da forte necessidade de reflexão socioambiental na prática da Engenharia. O ponto de partida dessas reflexões deve se situar já na fase de elaboração ou revisão do plano diretor (CAMAPUM DE CARVALHO e LEUZINGER, 2009), pois a interferência ambiental pode ser muito mais um problema de conjunto que de cada obra isoladamente, lembrando que a responsabilidade civil do todo não eliminará a da parte.

É evidente que ao engenheiro e à empresa de engenharia não é possível, no desempenho das atividades que lhes são inerentes, manter incólume o meio ambiente, mas ambos devem atuar continuamente com prevenção e precaução, de modo a evitar os danos ambientais ou mitigá-los no limite do possível.

No contexto das catástrofes ligadas ao clima, há que se considerarem ainda, na prática da engenharia, os princípios fundamentais do direito à vida e à sadia qualidade de vida, não permitindo que a população, independentemente de classe social, viva em situação de perigo.

Referências bibliográficas

BENJAMIN, A. H. (1998). Responsabilidade civil pelo dano ambiental. Revista de Direito Ambiental. São Paulo, ano 3, n. 9, p. 5-52.

BRASIL. Poder Legislativo (1981). Lei Nº 6.938 – Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União de 02/09/1981. Brasília, DF.

_____. Poder Legislativo (1988). Constituição da República Federativa do Brasil (2011). Texto promulgado em 05 de outubro de 1988. Edição do Senado Federal. Brasília, DF.

_____. Poder Legislativo (1989). Lei Nº 7.804 – Altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, a Lei nº 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, a Lei nº 6.803, de 2 de julho de 1980, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 20/07/1989. Brasília, DF.

_____. Poder Legislativo (1998). Lei Nº 9.605 – Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 13/02/1998. Brasília, DF.

_____. Poder Legislativo (1999). Lei Nº 9.795 – Política Nacional de Educação Ambiental. Diário Oficial da União de 28/04/1999. Brasília, DF.

_____. Poder Legislativo (2002). Lei Nº 10.406 – Código Civil. Diário Oficial da União de 11/01/2002. Brasília, DF.

_____. Poder Legislativo (2012). Lei Nº 12.608 – Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC, autoriza a criação de

sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. Diário Oficial da União de 11/04/2012. Brasília, DF.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2009a). Aspectos técnicos, jurídicos e educacionais e a expansão urbana ambientalmente sustentável. Brasília, DF: UniCEUB. 90 p. Monografia (Bacharelado em Direito), Centro Universitário de Brasília, Faculdade de Ciências Jurídicas e de Ciências Sociais, Brasília, DF.

_____. (2011). A engenharia e as catástrofes oriundas de elevadas precipitações pluviométricas. São Paulo: Revista Fundações & Obras Geotécnicas. Caderno Especial Chuvas, ano 1, n. 5, p. 6-12.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. T. (2009b). O "poluidor indireto" e a responsabilidade civil por dano ambiental. Brasília, DF: UniCEUB. 90 p. Monografia (Bacharelado em Direito), Centro Universitário de Brasília, Faculdade de Ciências Jurídicas e de Ciências Sociais, Brasília, DF.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEUZINGER, M.D. (2009). Considerações sobre o Estatuto da Cidade. Senado Federal, Revista de Informação Legislativa, Brasília, ano 46, n. 182, p. 121-135.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PASTORE, E. L.; PEREIRA, J. H. F.; FRANCO, H. A.; BROSTEL, R. C. (1999). Estudo e solução para os problemas de erosão interna nas lagoas de estabilização de Recanto da Emas – DF. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL - REGEO'99, 4, 2 a 4 de dezembro de 1999, São José dos Campos, Anais... São José dos Campos: ABMS. v. 1, p. 1-9.

CASCINO, F. (2000). Educação ambiental: princípios, história, formação de professores. 2. ed., São Paulo: Editora SENAC. 109 p.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. (2001). Agenda 21. 3. ed., Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas. 598 p.

CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – CONMETRO. (1992). Resolução 7 de 24/08/1992.

DIAS, G. F. (1998). Educação ambiental: princípio e práticas. 5. ed., São Paulo: Editora Gaia. 400 p.

D'ISEP, C.F.M. (2010). Água juridicamente sustentável. São Pulo: Editora Revista dos Tribunais. 317 p.

FERREIRA, G. L. B. V.; SILVA, S. T. (2007). Análise dos fundamentos da compensação ambiental: a responsabilidade civil *ex ante* no direito brasileiro. Revista de Informação Legislativa, Brasília, ano 44, n. 175, p. 125-137.

FIORILLO. C. A. P. (2011). Curso de direito ambiental brasileiro. 12. ed., São Paulo: Saraiva. 866 p.

LANFREDI, G. F. (2001). Reparação e educação: instrumentos de efetividade para a tutela ambiental e o desenvolvimento sustentável. São Paulo: USP, 234 p. Tese (Doutorado em Direito), Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.

LEMOS, P. F. I. (2008). Meio ambiente e responsabilidade civil do proprietário: Análise do nexo causal. 1. ed., São Paulo: Revista dos Tribunais. 190 p.

LEUZINGER, M. D.; CUREAU, S. (2008). Direito ambiental. Rio de Janeiro: Elsevier. 192 p.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília, DF: UnB. 336 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, G.TD-17A/03.

MACHADO, P. A. L. (2007). Direito ambiental brasileiro. São Paulo: Malheiros, 15. ed., 1111 p.

MILARÉ, E.; LOURES, F. T. R. (2004). Responsabilidade administrativa em matéria ambiental. *In*: FIGUEIREDO, G. J. P. de (Coord.). Direito Ambiental em Debate. **v**. 2, Rio de Janeiro: Esplanada. p. 143-200.

PONTES DE MIRANDA, F. C. (1987). Comentários à Constituição Federal de 1967 com a Emenda nº 1, de 1969. Rio de Janeiro: Forense.

SILVA, J. A. (2007). Direito ambiental constitucional. 6. ed., São Paulo: Malheiros. 351 p.

_____. (2008). Direito urbanístico brasileiro. 5. ed., São Paulo: Editora Malheiros. 476 p.

STEIGLEDER, A. M. (2004). Responsabilidade civil ambiental: as dimensões do dano ambiental no direito brasileiro. 1. ed., Porto Alegre: Livraria do Advogado.

VITTA, H. G. (2008). Responsabilidade civil e administrativa por dano ambiental. São Paulo: Malheiros Editores. 166 p.

Capítulo 2
A infiltração no contexto do plano urbanístico e dos projetos paisagístico e arquitetônico

José Camapum de Carvalho
Gislaine Cristina Luiz
Tatiana Diniz Gonçalves

1 Introdução

A redução da infiltração natural das águas pluviais no solo vem se dando de modo intenso tanto no meio rural como no urbano, aqui se incluindo as áreas de expansão urbana. Em ambos os meios, rural e urbano, a redução da infiltração está em grande parte atrelada à ocupação e ao uso inapropriados do solo, e comumente as consequências se somam a fenômenos como o da inundação. Apesar disso, este capítulo focará apenas as questões urbanas.

A expansão urbana que se observa hoje nas principais cidades do Brasil se estruturou, e ainda vem se estruturando, com deficiências ou mesmo sem qualquer planejamento, criando diversas condições ambientais inadequadas, dentre as quais se destacam a impermeabilização das superfícies e a consequente redução da infiltração natural das águas pluviais. Segundo Canholi (2005), "historicamente, os engenheiros responsáveis pela drenagem urbana tentaram solucionar o problema da perda de armazenamento natural provocando o aumento da velocidade dos escoamentos com obras de canalização".

Graves problemas socioambientais decorrentes de deficiências ou mesmo da inexistência de planejamento urbano, como erosões, enchentes, alagamentos e assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios, ocorrem devido ao aumento do escoamento superficial gerado pela redução da infiltração. Acrescenta-se, como consequência dessa diminuição da infiltração, o rebaixamento muitas vezes demasiado dos níveis freáticos, que resultam na redução da vazão de nascentes e da descarga de base dos rios, sobretudo nos períodos de estiagem.

Encontrar soluções satisfatórias para problemas que envolvem o desequilíbrio da dinâmica do ciclo hídrico em zonas urbanas e seu entorno é sempre tarefa muito difícil, porém, necessária e indispensável à qualidade de vida da população.

Políticas públicas devem buscar as referidas soluções; entretanto percebe-se, frequentemente, a omissão do Estado não só no que se refere à regulação do uso e da ocupação do solo, mas também, no que diz respeito à manutenção dos sistemas ambientais. O zoneamento e a regulação do uso do solo, no âmbito do planejamento urbano, devem ser prioridades, a fim de que seja garantida uma adequada capacidade de infiltração inicial dos solos ou sejam construídos sistemas de infiltração compensatórios.

Esforços isolados certamente contribuem para a mitigação de problemas socioambientais. No entanto, o conhecimento das partes, aliado à ideia de que as juntando se conhecerá o

todo, não tem conseguido dar respostas efetivas aos referidos casos, pois a interlocução entre elas é deficiente, quiçá inexistente. Soluções mais amplas e definitivas passam por propostas de planejamento e conjugação de esforços no sentido de buscar o desenvolvimento de estudos e ações mais que multidisciplinares, transdisciplinares.

Dentro desta visão mais ampla de tratamento transdisciplinar dos problemas socioambientais que afetam as áreas urbanas e periurbanas, este capítulo trata de questões gerais relativas a elementos de engenharia e arquitetura, importantes para o urbanismo, o paisagismo e o projeto arquitetônico. São discutidos aspectos externos e internos ao meio físico, ligados ao comportamento do maciço e ao fluxo de água a ele impostos. São ainda abordados os aspectos de superfície que intervêm no processo de infiltração.

A infiltração no contexto do plano urbanístico e dos projetos paisagísticos e arquitetônicos deve ser vista em escalas diferentes, mas compreendendo o todo, como ilustra a Figura 1. No urbanismo, o olhar deve ser amplo, mas, à medida que vai se afunilando, passa pelo paisagismo até chegar ao olhar pontual no projeto arquitetônico. As ações devem ser integradas e harmoniosas.

Figura 1. Olhar integrado em diferentes amplitudes sobre o urbanismo, o paisagismo e o projeto arquitetônico.

Apesar da necessidade desta percepção em escalas distintas do plano urbanístico e dos projetos paisagístico e arquitetônico, cabe aqui citar Camapum de Carvalho *et al.* (2009, p. 359), que, ao discutirem questões urbanísticas e os projetos geotécnicos de escavação e fundação, pontuaram:

> É comum na engenharia se compartimentar os estudos e projetos. Perde-se a concepção geral e aprofunda-se de modo desproporcional nas questões tópicas. Essa perda de visão global e integrada vai desde a concepção e definição do traçado urbanístico até a simples construção de um edifício, esta também, em si, quase sempre pouco integrada nas diferentes fases dos distintos projetos, arquitetura, estrutura, geotecnia, sistemas hidráulicos e de esgoto etc.

Hoje, embora a tendência seja à escassez de água no Planeta, as águas pluviais são, muitas vezes, vistas como um problema, pois a elas se atrelam problemas como erosões, alagamentos e inundações. Este capítulo busca situar as águas pluviais no campo das soluções para a escassez de água no planeta, remetendo os problemas delas oriundos ao campo da gestão socioambiental.

2 Urbanismo

O urbanismo é visto aqui de modo geral, tocando as questões de estudo, planejamento, regulação e controle do desenvolvimento urbano. A análise aborda principalmente as questões de engenharia e, brevemente, a regulação e o controle. As discussões se voltam, sobretudo, para o meio físico, embora se saiba que, sendo de natureza eminentemente multidisciplinar, deveriam compreender um escopo muito mais amplo que envolvesse tópicos como a sociologia urbana. Embora o urbanismo deva ser entendido como uma ciência humana, o foco neste capítulo está sobre as questões de engenharia geotécnica, importantes para o seu desenvolvimento. Para discuti-las, são levados em consideração aspectos do meio físico externo (ambientais e de ocupação e uso do solo) e interno (características do maciço e do fluxo de água em seu interior), com base em uma visão simplista, de modo a fazer uma reflexão sobre diretrizes de engenharia relevantes para se projetarem e ordenarem as cidades brasileiras. O trato das questões visa o homem, a vida e sua qualidade e, assim sendo, não há como negar: o Capital e o Estado serão beneficiários, sem que possam ser admitidos ou vistos como simples detentores.

Historicamente tem sido admitido o termo urbanismo como derivado dos estudos do engenheiro catalão Ildelfons Cerdá, que trouxe para a remodelagem das cidades grandes contribuições no século XIX. Embora sem usar diretamente o termo urbanismo, Cerdá utilizou o termo *urbe* referindo-se aos diferentes tipos de assentamento humano e o termo urbanização como definidor da ação humana sobre os assentamentos. Talvez pela sua formação técnica de engenheiro e pela sua sensibilidade socioambiental seja possível perceber em sua obra a valorização da qualidade de vida para que se tivesse um bom funcionamento das cidades.

Cerdà projetou a extensão da cidade de Barcelona para além das muralhas, demolidas em 1854 – o Eixample, projeto arrojado na infraestrutura sanitária, no sistema viário e no desenho de quarteirões integrados ao espaço urbano em praças internas, destacando, também, a necessidade da existência de áreas verdes –, as quais se insiste aqui, nas cidades brasileiras, dezesseis décadas mais tarde, em não se preservar, seja por pressão do mercado, seja, o que é pior, pela cultura da população não esculpida devidamente pelo processo educacional.

Treze anos depois, Cerdà publicou sua *Teoria Geral da Urbanização*, em que consolidou os princípios técnicos da engenharia urbana, utilizados por décadas no melhoramento de grandes cidades do mundo no início do século XX.

A abordagem sobre o Urbanismo com foco na infiltração é feita levando-se em conta:

- fatores externos;
- fatores internos;
- fatores relacionados à superfície.

2.1 Fatores externos

Vários são os fatores externos, exógenos, relevantes para o urbanismo, embora aqui se restrinjam apenas àqueles ligados aos temas clima e ocupação e uso do solo, de grande relevância para o processo de infiltração. Cabe destacar que a infiltração constitui-se em apenas um dos aspectos a serem observados na definição do plano urbanístico; vários outros devem

ser avaliados, como é o caso do acesso, do abastecimento, do saneamento básico e, ainda, das feições físicas do meio como fatores topográficos e geológicos.

A atmosfera terrestre é composta principalmente de nitrogênio (78,1 %), oxigênio (20,9 %) e argônio (0,93 %), gases como vapor de água, dióxido de carbono, amônia e outros. Apesar de serem encontrados em concentrações bastante inferiores, são extremamente eficientes no balanço energético entre superfície e atmosfera. Dentre esses gases, o vapor de água, além de desempenhar importante papel no equilíbrio energético da atmosfera, indica demanda e oferta de umidade de determinado local. A sua concentração na atmosfera é estreitamente relacionada com a temperatura do ar e com a disponibilidade de água na superfície terrestre. Logo, não é uniformemente distribuída, estando presente em maior quantidade em suas camadas de menor altitude, abaixo de 2000 metros (AYOADE, 1991). Apesar de esses gases serem importantes na análise do balanço energético entre superfície e atmosfera, neste capítulo são abordados apenas aspectos como insolação, temperatura, umidade relativa, vento, nível e ditribuição das precipitações, pois são eles que interferem mais diretamente na interação solo-atmosfera e no processo de infiltração.

Na natureza ocorre uma contínua interação entre a atmosfera e o solo. Assim, ao se variarem a umidade e a temperatura do ambiente externo, variam-se, para que ocorra o equilíbrio de energia, as condições de umidade, temperatura e, em certos casos, porosidade do maciço, em especial nas camadas mais superficiais do ambiente interno. Intervêm nessa interação fatores como a geomorfologia e a cobertura vetetal. Na interação solo-atmosfera, o solo apresenta, em determinado momento, uma umidade de equilíbrio que, ao longo de dias, meses e anos, deve ser vista como faixa de umidade de equilíbrio. No caso da infiltração no âmbito do Urbanismo, deve-se considerar como balizadora a faixa de umidade de equilíbrio do período no qual ocorrem as precipitações. É certo que no Urbanismo o nível de detalhe deve ser o da faixa de umidade, mas nos casos dos Projetos Paisagístico e Arquitetônico é importante que se leve em conta valores críticos de umidade de equilíbrio, máximo e mínimo. Isso se deve não apenas ao problema da infiltração, mas também à necessidade de definição de espécies vegetais a serem utilizadas em projetos paisagísticos e estabelecimento de técnicas construtivas apropriadas no projeto arquitetônico.

Diante do exposto, um dos principais fatores externos a serem considerados no Urbanismo é o clima, e não apenas pela questão da infiltração. A discussão aqui se limita à importância dos aspectos definidores do clima: insolação, temperatura, umidade relativa, precipitação e vento. Esses aspectos se interrelacionam e são definidores da capacidade de infiltração das águas pluviais no solo, contexto no qual serão considerados, embora o Urbanismo deva considerá-los como balizadores de outros elementos, como é o caso do conforto térmico. Nesse caso, por exemplo, a temperatura pode ditar a necessidade de aquecimento resistencial ou de refrigeração, e a umidade relativa, a necessidade ou não de se criarem, no plano urbanístico, condições propícias para que atendam limites apropriados a uma vida mais confortável e sadia.

2.1.1 Insolação

Insolação e temperatura, embora diretamente relacionadas, não podem ser tratadas como aspectos idênticos. Mesmo que a temperatura média do ar possa, em uma determinada

área, variar pouco, as condições de insolação vão impor, dependendo da latitude, da hora do dia, da época do ano, da exposição, do relevo, do uso do solo, da cobertura vegetal, variações térmicas à superfície do solo que podem ser importantes no contexto do planejamento urbanístico, principalmente nas regiões tropicais devido ao elevado ganho de energia ao longo do ano. O nível de insolação está estreitamente relacionado com a incidência dos raios solares e é mensurado pela quantidade, em horas, em que uma determinada superfície fica exposta aos raios solares.

A energia solar incidente sobre uma superfície consiste na principal fonte de energia para os processos físicos e químicos, como aquecimento do ar e do solo, fluxo da água e dos ventos, que ocorrem na interface superfície/atmosfera (AZEVEDO *et al*., 1990). É variável em seus totais e em duração, o que depende da declinação solar (δ) e da latitude (φ), e está diretamente relacionada à altura solar (h) de cada lugar. A Figura 2 apresenta como ilustração a variação sazonal da incidência dos raios e do ângulo da altura solar (h) correspondente a diferentes cidades brasileiras. A altura solar é expressa segundo a Lei do Cosseno de Lambert (TUBELIS e NASCIMENTO, 1992). Essa lei considera que os raios solares incidentes sobre uma superfície dependem da orientação da radiação, expressa pela Equação 1 (MARIN *et al.*, 2008).

$$Q = Q_n \times \cos \Theta \quad (1)$$

em que:
Q = irradiância incidente sobre uma superfície;
Q_n = irradiância hipotética sobre uma superfície;
Θ = ângulo entre a direção da radiação e a normal à superfície.

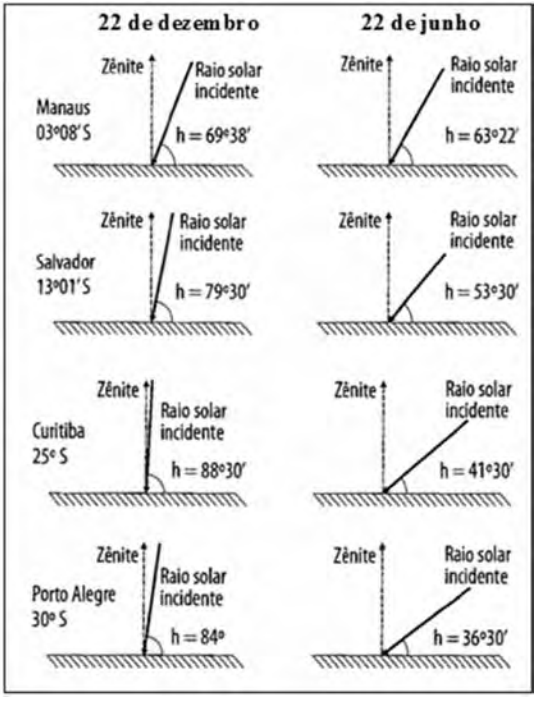


Figura 2. Alturas solares simultâneas em algumas capitais de estados brasileiros: verão e inverno (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Logo, a relação entre temperatura e incidência dos raios solares está relacionada às variaçoes diárias e anuais da altura solar (h) do lugar. Quanto mais perpendicular incidir os raios solares, menor será a altura do ângulo solar e também menor será a área da superfície atingida, o que decorre em maior concentração de energia por unidade de área. Consequentemente, o aquecimento dessas superfícies será maior se comparada à incidência de raios em superfícies cujo ângulo seja oblíquo (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Assim, quanto mais perpendicular a incidência dos raios solares, temperaturas mais elevadas ocorrerem na superfície do solo e, como consequência, maior energia disponível para o processo de evapotranspiração. Por um lado, a evapotranspiração promoverá o ressecamento do solo com aumento da sucção nele atuante, intervindo assim, na capacidade de infiltração.

É importante lembrar que, ao se alterarem as condições de evapotranpiração, alteram-se o balanço hídrico e as condições de precipitação. A elevação da temperatura na superfície do solo, por sua vez, pode impor variações térmicas no fluido durante o seu trajeto, interferindo, assim, na infiltração por meio de alterações nas características do fluido de percolação, como viscosidade e densidade.

A Figura 3 mostra imagens feitas em novembro de 2011 dos taludes do corte da via de acesso à ponte JK, em Brasília, partindo-se da DF 001 em direção ao Plano Piloto. Percebe-se, na Figura 1a, que a vegetação no talude voltado para a nascente encontra-se muito mais exuberante e densa que no talude voltado para poente mostrado na Figura 1b. Destaca-se que o período e a técnica de plantio foram os mesmos nos dois casos. Aparentemente, estaria a insolação, nesse caso, interferindo na umidade de equilíbrio solo-atmosfera, definindo a maior e a menor exuberância e densidade da vegetação. É evidente que outros fatores, como a forma do relevo e a hidrogeologia, contribuem para esse processo de interação solo-atmosfera. No tocante ao parâmetro relevo, o exemplo citado ilustra bem a relevância da inclinação das superfícies do terreno associada à sua exposição aos raios solares, como fatores importantes na distribuição da energia "calorífica-luminosa", corroborando o que Geiger (1990) denomina de "clima de encosta". Segundo o referido autor, quanto maior a inclinação de uma dada superfície, maior é a concentração de energia.

(a) (b)

Figura 3. Via de acesso à ponte JK em Brasília, DF.

Ainda sobre a interação solo-atmosfera, cabe destacar o efeito dos ciclos de molhagem e secagem na variação volumétrica do solo. Geralmente, o umedecimento conduz ao aumento da porosidade e a secagem, à sua diminuição. Esse movimento de expansão e contração não

é, porém, dotado de completa reversibilidade. O grau de reversibilidade dependerá não só da composição químico-mineralógica do solo, mas também da sua cobertura, da atividade biológica e das bioturbações. Solos desnudos tendem a apresentar menor reversibilidade e maior grau de variação de porosidade em relação ao estado inicial. Em se tratando de solos argilosos e siltosos com partículas lamelares não estruradas, é comum que o processo se faça acompanhar da orientação das partículas paralelamente à superfície do terreno, o que contribui para reduzir a taxa de infiltração. No caso de as partículas de argila e/ou silte encontrarem-se estruturadas, formando agregados estáveis, o fenômeno é minimizado. Brandão *et al.* (2006) discutem a questão mostrando a importância das feições estruturais dos solos como definidoras da taxa de infiltração e exemplicam com estudos presentes na literatura.

Ilustrando a importância da insolação para a maior ou menor alteração dos materiais expostos à radiação, a Figura 4 mostra o caso de um muro de contenção localizado no Distrito Federal, no lado sudoeste da Esplanada dos Ministérios, ou seja, sujeito predominantemente ao sol da tarde. Nesse caso, existia um contato direto entre o solo e o material do muro e da face (solo e muro) com a atmosfera. Os múltiplos ciclos de umedecimento e secagem entre os períodos de insolação e os de sobreamento e noturno conduziram à degradação dos elementos estruturais de concreto. Cabe destacar que, no lado oposto da Esplanada, voltado para nordeste, tais deteriorações no mesmo tipo de estrutura não foram, na época, observadas.

No âmbito do Urbanismo, é importante considerar pesquisas realizadas nos trópicos desde a década de 1950, as quais indicam que as superfícies das paredes voltadas para leste e oeste apresentam maior variação térmica ao longo do ano (GEIGER, 1990). Além dessa variação anual das paredes voltadas para leste e oeste nos trópicos, no Hemisfério Sul as exposições voltadas para norte, noroeste, nordeste, oeste e leste recebem mais energia "calorífico-luminosa", quando comparadas com aquelas cujas faces estão voltadas para outras direções (MENDONÇA, 1994).

(a) (b)

Figura 4. a) Vista geral de muro degradado; b) detalhe da degradação.

Portanto, a insolação deve ser vista como um elemento importante no Plano Urbanístico, não apenas pelos exemplos mostrados, mas também porque hoje a energia solar constitui-se em riqueza natural importante a ser utilizada pelo homem. Quando se consideram as regiões tropicais, essa importância deve ser uma preocupação redobrada nos Planos Urbanísticos devido ao elevado ganho anual de energia, que, associado às modificações intensas das superfícies, tende a influenciar no aumento das temperaturas. É evidente que em uma

área urbana haverá obras nas mais diversas orientações; no entanto, o Plano Urbanístico deve atentar para a questão da insolação, de modo a maximizar o seu benefício e minimizar os problemas dele oriundos. Com relação à infiltração, quanto maior o nível de insolação, maior será a desidratação do solo e maior a sucção nele atuante. Restrepo (2010) e Silva (2012), ao estudarem a infiltração em um prefil de solo profundamente intemperizado, constaram que a taxa de infiltração inicial tende a aumentar com o aumento da sucção e, portanto, com o nível de insolação.

2.1.2 Temperatura

Por um lado, a temperatura intervém na taxa de infiltração de água no solo na medida em que, ao se elevar a temperatura dos fluidos, diminui a viscosidade desses fluidos, aumentando a velocidade de infiltração. Por outro lado, a temperatura afeta a umidade, a porosidade e, por consequência, a sucção do solo, intervindo na taxa de infiltração. Além disso, a temperatura guarda relação importante com a insolação e é desencadeadora de vários fenômenos atmosféricos e ambientais.

A insolação, ao ser associada aos fatores físicos geográficos, como latitude, maritimidade/continentalidade e relevo (altitude e forma), constitui-se em fator relevante à compreensão do comportamento da temperatura do ar. Tais fatores devem ser contemplados nos planejamentos urbanísticos no sentido de avaliarem-se as implicações das modificações impostas no ambiente e o efeito *feedback* dos valores da temperatura, tanto no ambiente (local) quanto nas cidades como um todo.

Nos Planos Urbanísticos, a temperatura é geralmente vista como uma característica climática regional, muitas vezes observada pelas Normais Climatológicas. No entanto, essas médias são generalistas e não evidenciam as particularidades locais. É importante ressaltar que a temperatura apresenta estreita relação com fatores associados à dinâmica regional do clima e à própria ocupação e uso do solo. A cidade de Goiânia-GO, situada no interior do continente, entre as coordenadas planas E: 662.000 e 760.000 m e N: 8.141.000 e 8.179.000 m, é um exemplo da influência dos processos urbanos no comportamento da temperatura do ar em uma região tropical.

A Figura 5 mostra que, para a cidade de Goiânia, a temperatura média compensada anual vem aumentando com o número de habitantes. Esse aumento foi verificado na elevação tanto na média da temperatura máxima quanto na mínima, entre 1,6 e 2,4 C nos últimos 48 anos. Esse comportamento da temperatura do ar apresenta forte relação com os fatores relacionados à continentalidade e ao ângulo solar, associados à ocupação urbana e à baixa velocidade dos ventos. (LUIZ, 2012). Os fatores continentalidade e ângulo solar acentuam o ganho de energia dada à característica de continentalidade da cidade. Por outro lado, o crescimento da população está atrelado a vários fatores que funcionam como forçantes radioativos responsáveis pelo aumento da temperatura, tais como: elevação na frota de veículos, aumento na concentração de particulados na atmosfera, aumento de área construída e pavimentada. Além disso, a baixa velocidade dos ventos impõe ao local a característica, popularmente chamada, de "abafada", por não haver a renovação do ar. Segundo Campos *et al.* (2003), a média anual da velocidade dos ventos na região de Goânia fica em torno de 1 m/s.

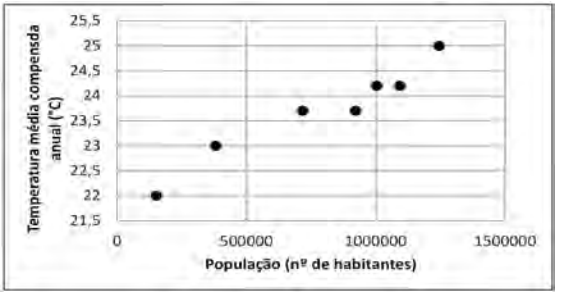
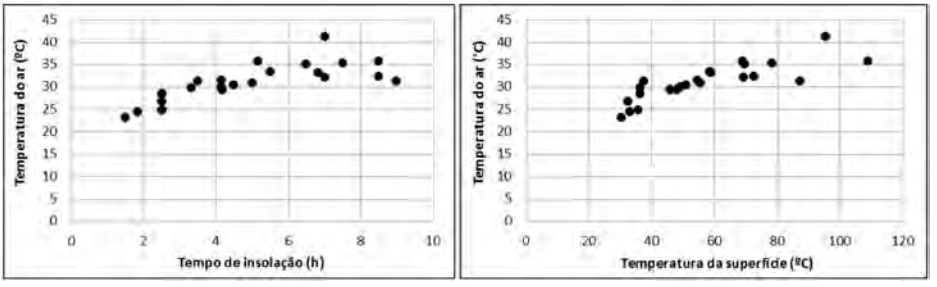


Figura 5. Correlação entre temperatura média compensada anual e popupação da cidade de Goiânia entre 1960 e 2007 (LUIZ, 2012).

A Figura 6, obtida a partir de dados climatólogicos de Goiânia (LUIZ, 2012), mostra que a temperatura do ar (a) aumenta com o tempo de insolação e (b) está associada à temperatura da superfície. Nesse aspecto, é relevante considerar que, além das estruturas urbanas (construções e pavimentações), as áreas periurbanas também contribuem para elevação da temperatura do ar, haja vista a comum associação dessas áreas às alterações na cobertura do solo, seja pela retirada da vegetação natural e a sua substituição por pastagem e culturas cíclicas, seja simplesmente por exposição do solo.



(a) (b)

Figura 6. a) Correlação entre temperatura do ar e tempo de insolação; b) correlação entre temperatura do ar e temperatura da superfície terrestre.

Para qualquer material de superfície, certas propriedades internas, como capacidade calorífica e condutividade térmica, influenciam a temperatura de um corpo. Essas propriedades térmicas variam de acordo com o tipo de solo e o teor de umidade. Solos secos, expostos e de baixa densidade têm sido associados a alta temperatura da superfície e a baixa inércia térmica (WENG *et al*., 2004; MENDONÇA, 1994). Essas superfícies tendem a ter maior energia radiante que, consequentemente, eleva a temperatura aparente aumentando a temperatura tanto das superfícies quanto das camadas de ar junto a essas superfícies. Nesse sentido, ressalta-se a relevância, no âmbito dos Planos Urbanísticos, dos estudos integrados e interdisciplinares na avaliação do meio físico. Essas análises devem partir das características do clima regional e dos aspectos morfológicos e morfométricos. Esses fatores juntos são subsídios à compreensão do comportamento da temperatura do ar, mediante alterações inerentes aos processos de urbanização.

2.1.3 Umidade relativa

A umidade relativa do ar varia com a temperatura ambiente e, nesse sentido, pelos motivos já expostos, termina intervindo na sucção e na taxa de infiltração. É extremamente relevante que os Planos Urbanísticos considerem a dinâmica regional do clima na análise da umidade relativa do ar e as possíveis modificações. Ao considerar a dinâmica do clima, o fator geográfico continentalidade/maritimidade assume papel relevante na caracterização da umidade de uma determinada localidade.

Muito embora as estruturas urbanas e a ocupação periurbana tendam a provocar aumento nas temperaturas, quando se associa o fator continentalidade, como é o caso das cidades de Goiânia e Brasília, dentre tantas outras, a distância de corpos hídricos, como oceanos e mares, naturalmente impõe às taxas de umidade relativa do ar estreita relação com as incurssões das massas de ar oriundas desses corpos hídricos para o interior do continente. Nas incurssões para o interior do continente, essas massas de ar sofrem alterações no conteúdo de umidade e temperatura; por outro lado, mediante o atual nível de retirada da cobertura vegetal, as regiões situadas no interior do continente tendem a alterar o balanço hidrológico evidenciado também em quedas nas taxas de evapotranspiração atuante na região, para aumentar o contéudo de umidade do ar. Nesse sentido, regiões situadas no interior do continente as quais apresentam superfícies altamente modificadas, principalmente pela intensificação do processo de urbanização e práticas agrícolas, ficam a mercê das chuvas sazonais para a melhoria nas condições de umidade relativa do ar.

Na camada superficial, a umidade do solo geralmente varia de modo a entrar em equilíbrio com a atmosfera, afetando o perfil de umidade como um todo, e a umidade relativa constitui-se em elemento importante nesse equilíbrio. Portanto, a umidade relativa, além de ser importante para a vida do homem, exerce influência na capacidade de infiltração do solo, pois esta se relaciona diretamente à sucção total nele atuante.

Portanto, a umidade relativa constitui-se em aspecto importante a ser considerado no Plano Urbanístico, de modo que se estabeleçam critérios de ocupação e uso do solo que assegurem condições ambientais satisfatórias. Em regiões mais áridas, a preservação de áreas verdes, mananciais e lagos ajudam a manter a umidade relativa em condições satisfatórias.

2.1.4 Precipitação

A precipitação constitui-se hoje em um dos fatores mais importantes dos atributos do clima a serem considerados no Plano Urbanístico, pois se, por um lado, é necessário água para o abastecimento humano, por outro, quando da precipitação, o fluxo de água deve ser disciplinado de modo a evitar problemas, como erosão, alagamento e inundação.

No que tange à erosão, é recomendável observar se nas formas predominantes do relevo existem possíveis feições erosivas, pois a presença destas constitui-se em sinal da fragilidade do solo frente ao fenômeno, requerendo maiores cuidados.

A precipicação deve ser analisada sob vários ângulos, cabendo destaque ao da intensidade e ao da distribuição. Ambos são definidores do volume de água disponibilizado para infiltração e escoamento superficial. É evidente que a capacidade de infiltração de uma de-

terminada área dependerá de uma série de outros fatores, como nível de impermeabilização, nível de preservação das áreas não impermeabilizadas, tipo de solo e geomorfologia. Em se tratando de regiões tropicais, é relevante considerar que a precipitação apresenta expressivas variações, tanto na intensidade quanto na distribuição, com episódios chuvosos tendendo a eventos torrenciais, configurando os extremos pluviométricos (AYOADE, 1991). As intensidades das precipitações são consideradas moderadas quando ocorrem eventos cuja altura pluviométrica atinge no máximo 6 mm em 10 minutos; são consideradas fortes, quando o volume precipitado chega a 10 mm em dez minutos, ou seja, 60 mm em uma hora (INMET, 1999). Considera-se, ainda, que os episódios pluviométricos distribuídos acima de 50 mm em 24 horas já representam possibilidades de transtornos no cotidiano da população urbana (SANT'ANNA e GARDIM, 1996).

Luiz (2012) apresenta o comportamento interanual da pluviometria para a cidade de Goiânia entre os períodos de 1961 a 2008 e mostra a expressiva variabilidade interanual, com extremo chuvoso em aproximadamente 2000 mm e o seco em 1050 mm. Desses eventos 83% são distribuídos principalmente no trimestre primavera-verão, e 90% dos episódios pluviométricos ocorrem com intensidade de até 25 mm em 24 horas. Ao se considerar a respectiva intensidade, há que se levar em conta o tempo em que esse montante precipitou, podendo se configurar em chuva intensa ou não, de acordo com a classificação do INMET. A referida autora indica ainda eventos de elevada magnitude, observados pelos episódios acumulados em 24 horas, de 124 mm em 19/01/1969, 136 mm em 9/12/19/2005 e de 134 mm em 22/12/1972.

Estudos têm apontado que existe uma estreita relação entre a urbanização e a modificação no comportamento das precipitações, principalmente quanto à intensidade. O aumento da temperatura associado a maior quantidade de particulados acumulados na atmosfera, intensificados nos centros urbanos, são fatores favoráveis à formação dos núcleos de condensação (ilhas de calor), o que justificaria o aumento nas ocorrências das chuvas intensas localizadas nas grandes metrópoles. Entretanto, Xavier e Xavier (1996) consideram a necessidade de estudos mais detalhados da pluviometria nos centros urbanizados, dada a complexidade desses processos nessas áreas.

A capacidade de infiltração dos solos está relacionada tanto às características químicas e físicas que os constituem, como à intensidade e distritribuição das precipitações. No caso de chuvas intensas, ao gerarem sobre a superfície do solo uma lâmida d'água, colocam, quando da infiltração, os espaços no solo (poros) ocupados por ar sob pressão, que passam então a atuar como uma barreira ao fluxo vertical da água que se infiltra. Nesse caso, a capacidade de infiltração do maciço (perfil do solo), em determinado momento, não se constitui em parâmetro intrínseco do solo, passando a depender de fatores como a distribuição pluviomérica. Geralmente, chuvas bem distribuídas aumentam a umidade do perfil de solo, reduzindo sua sucção e intervindo diretamente na infiltração.

As irregularidades das chuvas, tanto da intensidade quanto da distribuição, associadas ao nível de alteração da cobertura do solo, alteram o comportamento da infiltração. Nesse aspecto, chama-se a atenção para dois graves problemas ambientais relacionados à infiltração. O primeiro refere-se à alteração no abastecimento do lençol freático, e o segundo, ao aumento do volume do escoamento superficial das águas pluviais, os quais estão diretamente relacionados a inundações, alagamentos e processos erosivos.

Segundo Brandão *et al.* (2006), a chuva é ainda responsável pelo fenômeno do encrostamento superficial, que é um fenômeno limitador da infiltração. A sua influência dependerá não só das características do solo e de sua cobertura, como também das características das próprias gotas de chuva como dimensão, direção do impacto e energia final, sendo esta afetada por aspectos como velocidade e direção do vento.

Em se tratando de áreas impermeabilizadas e mesmo com elevado nível de degradação, como ocorrem nas grandes metrópoles, as intensidades das precipitações não são recebidas espacialmente de forma igual e, assim, podem ser consideradas relativas, dadas as especificidades do local, como, por exemplo, relacionadas aos fatores morfométricos, morfológicos e de ocupação e uso do solo.

2.1.5 Vento

No que concerne ao clima, o vento consiste no mecanismo que rege o transporte de uma massa de ar no sentido horizontal, sendo extremamente variável. Esse mecanismo resulta dos gradientes horizontais de pressão atmosférica, cuja variação depende dos fatores temperatura, altitude e umidade. Dentre esses fatores, no âmbito dos Planos Urbanísticos, a temperatura e a umidade são os mais relevantes, pois exercem influência no aquecimento diferencial entre locais próximos. A partir desse aquecimento diferenciado, gera-se uma célula de troca de ar entre duas localidades.

Assim, o vento é um fator climático relevante para a interação solo-atmosfera e, como tal, deve também ser levado em conta no plano urbanístico, porque, além dos esforços que impõe às estruturas, também atua regulando a temperatura e umidade do ar, como resposta da troca das massas de ar. Junto ao solo, como consequência do atrito entre massas de ar em deslocamento e a superfície do terreno, a velocidade do vento diminui, sendo nula junto à superfície (SIQUEIRA PINTO e AGUIAR NETTO, 2008). É importante ressaltar que, sobre superfícies vegetadas, a velocidade dos ventos se anula no topo da planta ou pouco abaixo dela (TUBELIS e NASCIMENTO, 1992). Nesse sentido, com foco no equilíbrio da interação solo-atmosfera, ressalta-se a relevância de Planos Urbanos e Periurbanos que não apenas prezem pela implantação ou manutenção da arborização nos centros urbanos, como também priorizem a análise espacial que considere as partes e o todo contemplando vários locais.

O vento, ao afetar a interação solo-atmosfera, influencia a infiltração das águas pluviais. Áreas mais sujeitas ao vento apresentam maior desidratação do solo e, por consequência, maior sucção, ampliando o gradiente hidráulico inicial. O vento exerce também, como já visto, grande influência sobre as características da precipitação, afetando o tamanho, a direção de incidência e a energia das gotas de chuva.

2.2 Fatores internos

Vários são os fatores internos importantes para a infiltração, tais como: tipo de solo, nível de intemperização e espessura do manto de intemperismo, presença e variação do lençol freático, tipos de rochas e outros parâmetros geológicos e hidrogeológicos. No plano urbanístico, a importância desses fatores extrapola a questão da infiltração, os quais devem ser

avaliados em sentido mais amplo. Por exemplo, a geologia estrutural e as condições hidrogeológicas locais, como as variações do nível d'água, assumem grande importância em projetos de fundação, contenção, impermeabilização e drenagem. Portanto, é preciso ter uma visão integrada quanto às tendências de uso e ocupação do solo.

Assim, em uma área urbana destinada a edifícios residenciais ou comerciais, deve-se, hoje no Brasil, dispensar atenção especial à necessidade de subsolos, pois estes podem interferir diretamente na posição do lençol freático ao afetarem o fluxo de água na subsuperfície, além de reduzirem a capacidade de armazenamento natural de água (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2009). A mesma atenção deve-se ter quando da opção por meios de transporte de massa, como os metrôs, os quais frequentemente necessitam de túneis que, além de intervirem nos fluxos subterrâneos, podem igualmente comprometer a capacidade de armazenamento de água no subsolo.

Como mencionado anteriormente, a capacidade de infiltração bem como a de armazenamento de água de um solo dependem de diversos fatores, inclusive de características texturais, estruturais e da distribuição granulométrica nos perfis. Entretanto, essas características devem ser avaliadas mantendo os solos em estado natural ou quase natural, ou seja, sem que a sua textura e estrutura sofram alterações em laboratório por meio do uso de agentes químicos, como os defloculantes, ou mecânicos, como os misturadores. As alterações das referidas características interferem sobremaneira nas taxas de condutividades hidráulica, isto é, na velocidade de percolação da água através dos poros dos solos e, consequentemente, na velocidade de descarga, impedindo o estabelecimento de relações com a capacidade de infiltração no campo.

A condutividade hidráulica é uma das propriedades essenciais dos solos e necessária a todos os estudos que envolvem o fluxo de água nesse meio. Ela se encontra associada às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Para fins de planos urbanísticos, esse parâmetro é um dos fatores preponderantes na escolha de materiais para, por exemplo, a construção de barreiras impermeabilizantes e de sistemas de infiltração. Assim, para que se defina a capacidade de infiltração de um perfil de solo, limitando-se às propriedades físicas, é fundamental considerar não só a textura e a estrutura dos solos, mas também o arranjo estrutural, a porosidade e a distribuição dos poros.

A porosidade e a distribuição de poros no solo estão, em regiões tropicais, quase sempre associadas ao grau e ao processo de intemperização sofridos. Essas características são extremamente importantes para o processo de infiltração, embora as propriedades do manto de intemperismo transcendam a questão da infiltração, pois são definidoras, por exemplo, do tipo de fundação e das condições de escavação.

No perfil de intemperismo, é comum o nível d'água freático, quando presente, encontrar-se no contato com o solo pouco intemperizado, solo saprolítico. Logo, geralmente, quanto menos espesso o manto de intemperismo, mais superficial é o nível d'água freático. Cabe destacar que quanto mais superficial for o nível d'água, maior deve ser a preocupação com a qualidade da água a ser infiltrada, devido ao aumento do risco de contaminação dessa água. A posição do nível d'água é, ainda, importante para se definir o tipo de estrutura de infiltração (poços, trincheiras, valas) a ser adotada no projeto de drenagem.

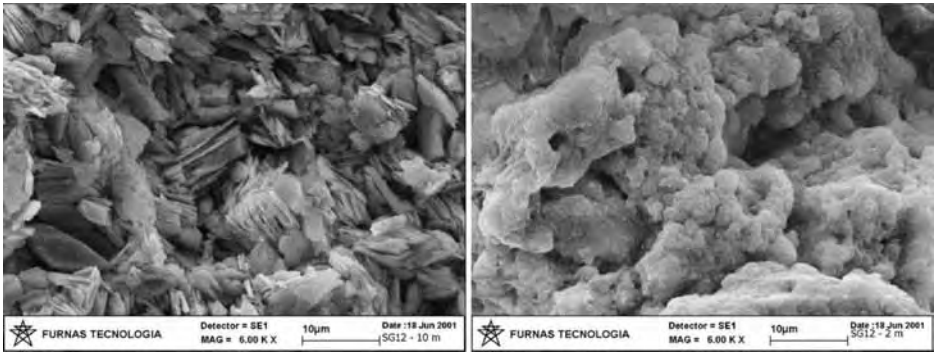
No processo de infiltração, as características físicas e químico-mineralógicas do manto de intemperismo assumem grande relevância. Mineralogicamente, os solos mais jovens, solos

saprolíticos, são, geralmente, constituídos de minerais primários e minerais expansivos. Segundo Brandão *et al.* (2006), os solos ricos em minerais expansivos apresentam, no processo de expansão, redução na condutividade hidráulica devido ao bloqueio e à redução do tamanho dos poros. Cabe destacar que a redução do tamanho de poros tende a ser marcante em condições de confinamento, devido ao impedimento da variação do volume total, o que faz com que parte do volume de vazios inicial se transforme em aumento da distância interplanar basal durante o processo de expansão mineralógica. Quando em condições de expansão livre, a redução da condutividade hidráulica não necessariamente ocorrerá.

Os solos tropicais profundamente intemperizados são, em geral, ricos em minerais do grupo da caulinita e em oxi-hidróxidos de alumínio e ferro. Esses minerais são pouco ativos e, geralmente, sujeitam o solo a pequenas variações volumétricas no processo de molhagem e secagem.

As características químicas do solo, por estarem diretamente ligadas a energias dispersoras e agregadoras das partículas de solo, assumem grande importância frente às caracterísiticas do fluido de infiltração, devido à presença de íons, como os de sódio, potácio, magnésio e cálcio, presentes com frequência nos insumos agrícolas e em águas servidas.

Apesar da importância da composição químico-mineralógica do solo frente à questão da infiltração, talvez a característica mais relevante seja a estrutural. Nos solos pouco intemperizados, as partículas se encontram mais ou menos independentes ou formando pacotes de argila (Figura 7a). Nesses solos, os poros disponíveis, utilizados no fluxo de água, estão disseminados no volume como um todo, formando distribuição bem graduada ou uniforme segundo a textura do solo. Esses solos comumente apresentam baixa condutividade hidráulica se comparados aos solos arenosos. Já os solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, apesar de muitas vezes argilosos, são marcados não só por elevadas porosidades inerentes ao processo de formação, como também pela distribuição de poros bimodal dividida predominantemente em macro e microporos. Os microporos se situam no interior dos agregados e os macroporos entre eles. A Figura 7b ilustra a estrutura que marca esse tipo de solo. Nela, os agregados são formados pelo agrupamento de partículas, sendo frequentes nos solos argilosos, nos quais a macroporosidade constitui-se em caminho preferencial para o fluxo de água e, não raro, apesar de muitas vezes argilos, apresentam condutividade hidráulica semelhante à das areias.

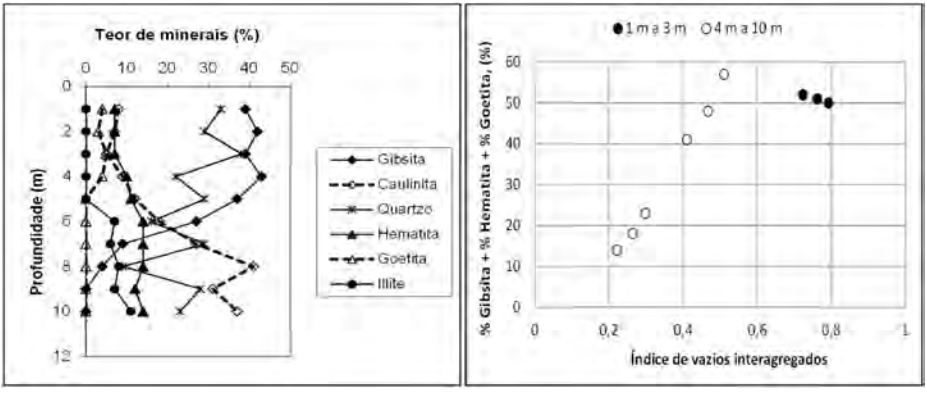


(a) (b)

Figura 7. a) Estrutura de um solo pouco intemperizado; b) estrutura de um solo profundamente intemperizado.

A estabilidade dos agregados presentes nos solos profundamente intemperizados está diretamente associada à sua composição químico-mineralógica e à presença de matéria orgânica.

A Figura 8a (CARVALHO, 1995) apresenta, como exemplo, a composição mineralógica de um perfil de intemperismo do Distrito Federal, e a Figura 8b mostra que o índice de vazios interagregado nesse perfil de solo está relacionado ao teor de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. No entanto, verifica-se, na Figura 8b, que a matéria orgânica, bem como a atividade biológica mais intensa presente nas camadas mais superficiais, levam ao aumento da porosidade. Portanto, considerando-se a Figura 8b, é possível concluir que, como o teor de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio presente nos solos tropicais tende a aumentar com o nível de intemperização, quanto mais intemperizado o solo, mais macroporoso ele será e, portanto, maior capacidade de infiltração ele apresentará. Essa capacidade de infiltração tende, ainda, a ampliar-se nas camadas mais superficiais devido ao aumento da macroporosidade em consequência da presença de matéria orgânica e de maior atividade biológica.



(a) (b)

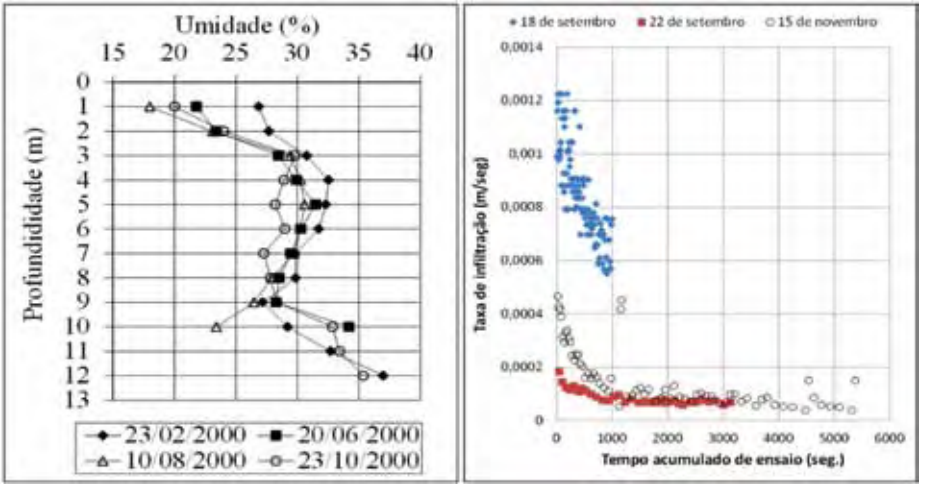
Figura 8. a) Perfis mineralógicos; b) variação do índice de vazios interagregado com o teor de oxi-hidróxido de ferro e alumínio.

A estrutura do solo natural ilustrada na Figura 7 e os índices de vazios interagregados mostrados na Figura 8b ilustram características do solo no estado natural. No entanto, o solo, ao passar por processo de antropização, terá a estrutura e a porosidade afetadas. Farias *et al.* (2011), ao estudarem um latossolo, solo profundamente intemperizado, mostraram que, geralmente, a microporisade desse solo é preservada no processo de compactação, sendo modificada, mais intensamente, a macroporosidade. Esse fato explica porque a compactação do solo propicia perda na capacidade de infiltração. A compactação poderá ocorrer em meio tanto rural como urbano, provocada por ciclos de molhagem e secagem, passagem de máquinas, pisoteio, etc.

A estrutura do solo poderá ainda ser alterada em consequência de ação de agentes químicos que atuam desestabilizando tanto a interação entre as partículas, quanto os próprios agregados. Embora esses agentes químicos possam estar presentes na própria água de precipitação, o mais frequente é que sejam provenientes de insumos e defensivos agrícolas em área rural e de águas servidas em áreas urbanas.

A alteração da estrutura do solo, seja em meio rural seja em meio urbano, traz sempre graves consequências para o processo de infiltração e, portanto, deve urbanisticamente ser analisado.

Além da composição químico-mineralógica e textural do solo, assim como de seu arranjo estrutural, é preciso que se leve em conta ainda o nível de hidratação em que se encontra o solo, pois este está diretamente relacionado à sucção e, portanto, ao gradiente hidráulico que atuará no maciço como condicionante do fluxo. A Figura 9a mostra que a umidade do mesmo perfil de solo mostrado nas Figuras 7 e 8 varia segundo o período do ano (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2002). A Figura 9b, por sua vez, mostra que, durante um ensaio de infiltração realizado no mesmo local em um furo de sondagem a trado com 0,10 m de diâmerro e 2 m de profundidade, a taxa de infiltração diminui com o tempo de ensaio até certo limite, pois com ele cai o gradiente hidráulico devido à sucção (RESTREPO, 2010). Essa figura mostra, ainda, que um segundo ensaio realizado no mesmo local apenas três dias após o primeiro, ou seja, em um perfil de solo mais úmido e sob efeito de menores sucções, fez com que a taxa de infiltração fosse muito inferior à inicial verificada no primeiro ensaio. Novamente repetido o ensaio no mês de novembro, a taxa de infitração, devido à menor umidade do perfil de solo, voltou a aumentar, refletindo mais uma vez a importância da sucção inicial. Esses ressultados corroboram o entendimento de Brandão *et al.* (2006), que consideram que "um solo mais úmido terá, inicialmente, menor taxa de infiltração, devido a um menor gradiente hidráulico, e mais rapidamente a taxa de infiltração se tornará constante". Portanto, a sucção influencia diretamente a capacidade de infiltração do solo, mas a análise do problema não é tão simples, pois envolve outros fatores, como a própria distribuição de poros. Em todo caso, esses resultados mostram que a taxa de infiltração inicial cresce com o aumento da sucção atuante no solo.



(a) (b)

Figura 9. a) Perfil de umidade; b) resultados de ensaios de infiltração.

É possível concluir que fatores internos como textura, estrutura e sucção interferem diretamente na capacidade de infiltração do solo. Essas questões devem ser analisadas quando do desenvolvimento do Plano Urbanístico.

2.3 Fatores de superfície

Os dois principais fatores de superfície a serem considerados quando da elaboração do Plano Urbanístico, no que tange à questão da infiltração, são a geomorfologia e a cobertura do solo. No que diz respeito à cobertura, devem-se prever, no plano urbanístico, sistemas compensatórios para infiltração das águas pluviais provenientes de áreas impermeabilizadas. Em alguns casos, como os das calçadas para circulação de pedestres, dos estacionamentos e das ruas com previsão de baixo volume de tráfego, o plano urbanístico deve prever, sempre que possível, o uso de pavimentos drenantes.

O relevo, de um modo geral, assume três formas básicas: topo, vertente e canal. O topo pode ser convexo ou plano e, quando plano, pode ser uma chapada ou platô. A vertente, por sua vez, é geralmente denominada de encosta ou talude, sendo, porém, o termo talude mais comumente utilizado para referir-se a cortes e aterros. As vertentes podem ser côncavas, convexas ou planas. O canal fluvial pode ser encaixado ou formar planícies. Essas diferentes formas de relevo vão intervir diretamente no processo de infiltração. Assim, por exemplo, uma vertente muito íngreme favorecerá o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Além disso, ao mesmo tempo em que intervém diretamente na infiltração, a forma do relevo intervém também no processo de intemperismo pelo qual passa o perfil de solo. Logo, a análise geomorfológica voltada para o plano urbanístico e para a questão da infiltração deve envolver além das formas de relevo, os tipos de solo e a vegetação que a ela se associam.

O tipo de cobertura do solo tem papel fundamental no processo de infiltração. A cobertura do solo, de modo a caracterizá-la como natural ou antropizada, deve ser vista sob perspectiva histórica. No plano urbanístico, a cobertura natural deve ser vista como algo cuja preservação deve ser maximizada, e a cobertura antropizada como área que deve, na medida do possível, ser recuperada. A análise sob perspectiva histórica é importante, pois em áreas antropizadas vários danos relativos à degradação do maciço e à poluição do lençol freático podem ter sido causados ao longo do tempo e devem ser levados em conta.

Na perspectiva dos efeitos da antropização no processo de infiltração, as áreas urbanas são as mais comprometidas devido à excessiva impermeabilização dos solos. Muitas vezes, as áreas rurais apresentam também elevados níveis de comprometimento da capacidade de infiltração, pois o uso de insumos e defensivos agrícolas que instabilizam a entrutura do solo, o uso de implementos agrícolas muitas vezes inapropriados e o pisoteio de animais aliado a ciclos de molhagem e secagem acabam por intensificar o processo de compactação e impermeabilização do solo.

De um modo geral, a cobertura natural é a que mais favorece o processo de infiltração, e o solo desnudo constitui a condição crítica de seu compremetimento.

Por dois motivos a cobertura vegetal atua no solo melhorando as condições de infiltração: porque reduz o fluxo superficial e porque o sistema radicular e outras formas de bioturbação criam caminhos que favorecem a infiltração da água.

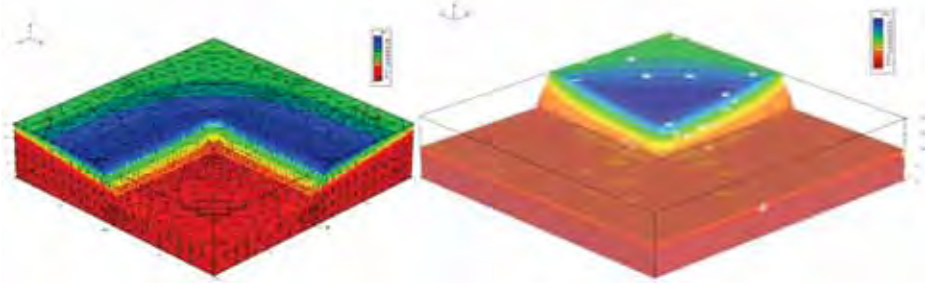
3 Paisagismo

As discussões realizadas no escopo do plano urbanístico são aplicáveis também ao projeto paisagístico. O que muda é a escala, o nível de detalhe, mas a conceituação geral é a mesma. O projeto paisagístico deve seguir as diretrizes estabelecidas no plano urbanístico.

De modo a favorecer a infiltração, o projeto paisagístico deve privilegiar a preservação da cobertura vegetal natural e adotar medidas compensatórias que restrinjam o uso de materiais impermeabilizantes, minimizando os efeitos de áreas impermeabilizadas pelas edificações.

Os projetos arquitetônicos, ao sugerirem alterações das formas de relevo e do tipo de cobertura, provocando a diminuição da infiltração de água nos solos, impõem aos projetos paisagísticos a obrigatoriedade não só de contemplar a ampliação das possibilidades de infiltração das águas pluviais, mas também de viabilizar o uso sustentável dessas águas. Além disso, ao se trabalharem as formas do relevo, deve-se evitar que o solo se submeta a desidratação excessiva, a qual seria nociva à vegetação e à propria preservação do balanço hídrico.

São elementos críticos na conformação do relevo a declividade e sua forma (côncava, convexa ou plana) e a sua conformação em planta (côncava ou convexa). A literatura dá grande ênfase ao fato de ser a encosta ou talude plano, convexo ou côncavo, mas, via de regra, não realça a peculiaridade de em planta ele ser côncavo ou convexo. A Figura 10 (CAMAPUM DE CARVALHO *et al*., 2007), obtida para simular duas formas de corte em presença de nível d'água freático, uma convexa (Figura 10a) e outra côncava (Figura 10b), mostra que o rebaixamento do nível d'água é maior no corte convexo que no côncavo. Ensaios realizados sobre modelo físico reduzido, para verificar o que se passava com a umidade do solo acima do lençol freático, levaram os mesmos autores à constatação de que a umidade no lado com corte convexo era mais elevada que no lado com corte côncavo. A explicação para o fenômeno tanto acima como abaixo do nível d'água é relativamente simples. No corte convexo, a área no interior do maciço que alimenta com água ou umidade a sua superfície é superior a esta, propiciando nível d'água mais elevado ou solo mais úmido na superfície. O inverso ocorre com o lado côncavo. No caso relatado por esses autores, o fenômeno conduziu à ruptura do talude.



(a) (b)

Figura 10. a) Corte côncavo; b) corte convexo.

As constatações acerca do fluxo no exemplo anterior se aplicam ao projeto paisagístico. A título de exemplo, pode-se observar, na imagem da Figura 11a, que no projeto paisagístico mostrado priorizou-se trabalhar o talude do corte com formas convexas, arquitetonicamente muito interessantes. A junção dessas formas levou a formas côncavas entre elas. A vegetação implantada não prosperou, e a gramínia existente a montante ocupou principalmente a parte côncava entre duas formas convexas (Figura 11b). Isso se deu exatamente em função do fato de que o solo, na conformação de relevo imposta pela convexidade, ficou extremamente exposto à desidratação, enquanto o côncavo, mediante o privilégio da forma, mantém-se mais hidratado. No mesmo empreendimento, pode ser observado que áreas mais sombreadas e,

portanto, menos sujeitas à desidratação por insolação tiveram a cobertura vegetal do talude mais preservada. Essa situação é muito comum em cortes rodoviários no Distrito Federal. É geralmente observado que, nos topos e nas bases dos taludes, a vegetação, devido à maior umidade, é mantida e, no restante do talude, é levada ao perecimento. Esse exemplo mostra a necessidade de o projeto paisagístico levar em conta a geometria das formas, de modo a favorecer não só a preservação da umidade em períodos críticos, como também a infiltração em períodos chuvosos, pois, em taludes como os mostrados, a infiltração tem pouca chance de ocorrer. Taludes íngremes e convexos se submetem a maiores gradientes de energia na interação com a atmosfera, conduzindo a sucção a valores acima do ponto de murcha da vegetação.

(a) (b)

Figura 11. a) Vista geral de um talude em corte; b) vista ampliada do corte.

A escolha de vegetação apropriada é ponto fundamental no projeto paisagístico, pois, dependendo da espécie escolhida, pode-se minimizar a evaporação e favorecer a infiltração por meio da distribuição radicular.

4 Projeto arquitetônico

Conforme observado na Figura 1, o projeto arquitetônico deve ser tratado como o menor elemento na escala de ocupação e uso do solo, mesmo que, em razão da limitação de espaço urbano, o projeto paisagístico inexista. Assim, apresentam-se duas situações distintas: o projeto arquitetônico inserido em um espaço livre ou confinado entre outros projetos arquitetônicos. No primeiro caso, o projeto deve buscar a utilização das águas pluviais, se não tratadas, em certas atividades domésticas, como lavagem de piso e irrigação de plantas e jardins; se tratadas, podem passar ao uso doméstico convencional. No segundo caso, as águas de chuva se destinarão tão somente ao uso doméstico. Em ambos os casos, o volume excedente pode ter duas destinações: a rede pública de drenagem de águas pluviais e a infiltração localizada, concentrada em poços, trincheiras e valas. Cabe destacar que o lançamento indiscriminado das águas pluviais na rede pública de drenagem requer sistemas de grandes dimensões e, portanto, de maior custo, além de constituir-se, muitas vezes, em raiz dos problemas de inundações oriundos do transbordamento das calhas dos elementos de drenagem natural, córregos e rios. Portanto, já em nível de Projeto Arquitetônico, deve ser pensada a destinação das águas pluviais.

Para o dimensionamento do sistema de coleta, armazenamento e infiltração, deve-se calcular a área impermeabilizada e recorrer às informações climatológicas para que se estime o volume de água proveniente da precipitação.

O sistema de infiltração deve ser devidamente projetado e o comportamento do maciço avaliado quanto a riscos provenientes da infiltração concentrada, dentre os quais se podem citar: erosão interna, perda da capacidade de suporte do solo, colapso no caso de solos profundamente intemperizados

5 Regulação e controle

Segundo Camapum de Carvalho (2009, p. 34),

> No Brasil várias aglomerações com características urbanas estão continuamente a surgir e as existentes a expandirem. A maioria delas, isso em ambos os casos, se dá sem qualquer planejamento, sendo comum a destruição de áreas de preservação ambiental, a abertura de ruas e avenidas obedecendo a um traçado urbanístico ambientalmente inadequado e a ocupação de áreas de risco como encostas e áreas alagadiças. Estabelecida a ocupação, quase sempre o resultado é a legalização nas condições em que a mesma se encontra, com raras intervenções buscando a mitigação dos danos ambientais gerados e a melhoria da qualidade de vida.

Tais fatos ocorrem porque faltam regulação e controle por parte do poder público. Mas antes de falar em regulação e controle, é importante frisar que a base para o respeito ao plano urbanístico e às normas edilícias reside na educação. Mais que dar à população conhecimento das normas existentes e puni-la por desrespeitá-las, é importante conscientizá-la da importância de se preservar o meio ambiente para a sua própria segurança e qualidade de vida.

Embora várias normas e regulamentos existam ou possam existir nos municípios, disciplinando o uso e a ocupação do solo, a principal regulação deve se dar no âmbito do plano diretor, pois nele está prevista a gestão democrática da cidade. Segundo Camapum de Carvalho e Leuzinger (2009, p. 133), no entanto:

> a participação dos cidadãos só se dá quando surge neles, em cada um e em todos, o sentimento e a necessidade do pertencimento e, para tal, faz-se necessária a construção ou o reconhecimento de valores pessoais, sociais e ambientais, entre outros, que contribuem para a qualidade de vida e para a preservação do equilíbrio ambiental, de modo a assegurar o desenvolvimento humano sustentável. Sem isso a gestão poderá ser democrática quanto a participação popular, mas não o será quanto a participação efetiva.

Portanto, a regulação do Plano Urbanístico deve constar do Plano Diretor, enquanto a dos Projetos Paisagísticos e Arquitetônicos deve decorrer de normas municipais específicas, como os Códigos de Edificação e os regulamentos de uso e ocupação do solo.

Quanto ao controle, sua formalização ocorre em duas fases distintas, a saber: o licenciamento e a fiscalização. Entretanto, para que o controle seja eficaz, torna-se fundamental a participação popular, seja no cumprimento dos deveres, seja na exigência dos seus direitos em busca de melhoria da qualidade de vida.

6 Considerações finais

O conjunto de fatores externos analisados opera na interação solo-atmosfera, afetando a sucção no solo e o volume de água nele inicialmente presente e, consequentemente, a capacidade de infiltração. Os efeitos dos agentes climáticos podem ser controlados ou mitigados por meio da definição de áreas apropriadas para ocupação, bem como do seu modo de utilização. Portanto, o plano urbanístico deve ser desenvolvido de modo a minimizar alterações significativas no balanço hídrico natural. Nesse sentido, deve-se priorizar a preservação da vegetação natural e, quando necessário, recuperar áreas já antropizadas. A intervenção na paisagem urbana com o objetivo de manter a água no solo constitui-se em prioridade, razão pela qual devem ser utilizados, sempre que possível, materiais e elementos construtivos drenantes que favoreçam a infiltração da água no solo.

A infiltração deve ser pensada no plano urbanístico como elemento de preservação do equilíbrio ambiental, pois a água não infiltrada pode ser a origem de problemas urbanos indesejáveis, como é o caso de erosões, alagamentos e inundações.

Assim, o plano urbanístico deve, no que tange à infiltração, levar em conta fatores internos como tipo e estrutura do solo, espessura do manto de intemperismo, altura e variação sazonal do nível d'água, dentre outros.

De modo a privilegiar a infiltração das águas pluviais e mitigar os danos delas provenientes, como erosões, alagamentos e inundações, vale repetir que o plano urbanístico deve fixar o traçado, definir áreas de preservação e estabelecer critérios apropriados de ocupação e uso do solo.

Em nível de projeto paisagístico e de projeto arquitetônico, as águas pluviais captadas poderão ser destinadas ao uso ou conduzidas a sistemas de drenagem. No entanto, os referidos sistemas, quando convencionais (galerias de drenagem), além de apresentarem elevado custo de implantação, podem contribuir para a ocorrência de alagamentos e inundações. Para minimizar esses problemas, torna-se recomendável conceber sistemas de infiltração setorizados, por unidade residencial, comercial ou industrial ou ainda por grupo dessas unidades. A implantação desses sistemas requer, no entanto, estudos geotécnicos preliminares de modo a evitar problemas como os de subsidência e erosão interna.

Referências bibliográficas

AZEVEDO, P. V.; RAMOS LEITÃO, M. M. V. B; SOUSA, I. F.; MACIEL, G. F. (1990). Balanço de radiação sobre culturas irrigadas no semi-árido do nordeste do Brasil. São Paulo: Revista Brasileira de Meteorologia, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1990, vol.5(1), p.403-410.

AYOADE, J. O. (1991). Introdução à climatologia para os trópicos. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil. 232 p.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. (2006). 3. ed. Infiltração da água no solo. Viçosa: Editora Universidade Federal de Viçosa. 120 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2009). Aspectos técnicos, jurídicos e educacionais e a expansão urbana ambientalmente sustentável. Brasília, DF: UniCEUB. 90 p. Monografia (Ba-

charelado em Direito), Centro Universitário de Brasília, Faculdade de Ciências Jurídicas e de Ciências Sociais, Brasília, DF.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. T.; LELIS, A. C. (2009). Engenharia, meio ambiente e expansão urbana. *In:* SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 6, 3 a 5 de novembro de 2009, São Paulo. São Paulo: Editores ABEF, ABMS, SINABEF e ABEG, Anais do SEFE VI, v. 2. p. 351-363.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GONZÁLEZ, Y. V.; SANTOS, M. A. A.; GITIRANA JR, G. F. N. (2007). Estabilidad de un talud cóncavo considerando condiciones en 3D. *In*: CONFERENCIA PANAMERICANA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA, 13, 16 a 20 de julho de 2007, Isla de Margarita. Isla Margarita: Editora ISSMGE. p. 988-993.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C.; PEREIRA, J. H. F. (2002). Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3, 10 a 13 de março, Recife, PE. Recife: A. A. Balkema Publishers, v. 1, p. 289-294.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEUZINGER, M. D. (2009). Considerações sobre o Estatuto da Cidade. Revista de Informação Legislativa, Brasília, ano 46, n. 182, p.121-135.

CAMPOS, J. E. G.; RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L.; MAGALHÃES, L. F., MARANHÃO SÁ, M. A. (2003). Diagnóstico hidrogeológico da região de Goiânia. AGIM/GO. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria da Indústria e Comércio. 125 p.

CANHOLI, A.P. (2005). Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: Oficina de Textos. 302 p.

CARVALHO, M. N. (1995). Mineralogia de um perfil de solo tropical. *In:* SEMINÁRIO DA DISCIPLINA GEOTECNIA DOS SOLOS TROPICAIS, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. 6 p.

FARIAS, W. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DA SILVA, G. F.; CAMPOS, I. C. O.; SANTOS NETO, P. M. (2011). Influência da compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7, 29 a 31 de agosto, Pirenópolis, GO, Pirenópolis: ABMS, v. 1, p. 169-175.

GEIGER, R. (1990). Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Glbenkian. 556 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (1999). Manual de observações meteorológicas, 3. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do abastecimento.

LUIZ, G. C. (2012). Relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – município de Goiânia/GO. Brasília: UnB, 271 fl. Tese (Doutorado em Goetecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.TD-075A/2012,

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. (2008). Introdução à climatologia para ciências ambientais. Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 126p.

MENDONÇA, F. A. (1994). O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno. Proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR. São Paulo: USP. 300 fl. Tese (Doutorado em Geografia Física), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. (2007). Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos. 206 p.

RESTREPO, J. M. S. (2010). Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Brasília, DF: UnB, 183 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM - 188/2010.

SANT'ANNA NETO, J. L.; GARDIM, P. (1996). Estação meteorológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente/SP. Boletim Climatológico. São Paulo: FCT/ Campus Presidente Prudente. Ano 01, Número 01, p. 12-39.

SILVA, J. P. (2012). Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos. Brasília: Brasília, DF: UnB, 211 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-074A/12.

SIQUEIRA PINTO, J. E. S.; AGUIAR NETTO, A. O. (2008). Clima, geografia e agrometeorologia: uma abordagem interdisciplina. São Cristovão: Editora UFS; Aracaju: Fundação Oviêdo Teixeira. 221 p.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. (1992). Meteorologia descritiva. 7. imp. São Paulo: Nobel, 375 p.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. (1996). Alterações climáticas urbanas em Fortaleza, Ceará (1974-95). *In:* Congresso Brasileiro de Meteorologia, 9, 1996. Campos do Jordão: v. 2, p. 117-176.

SIQUEIRA PINTO, J. E. S.; AGUIAR NETTO, A. O. (2008). Clima, geografia e agrometeorologia: uma abordagem interdisciplina. São Cristovão: Editora UFS.; Aracaju: Fundação Oviêdo Teixeira. 221 p.

WENG, Q.; DENGSEHG, L.; SCHBRING, J. (2004). Estimation of land surface temperature--vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, v. 89, n. 4, p. 467-483.

Capítulo 3
A influência do clima na infiltrabilidade do solo

Gislaine Cristina Luíz
Luis Fernando Ribeiro Martins
José Camapum de Carvalho

1 Introdução

A falta de planejamento voltado para o uso e ocupação do solo, condizente com a dinâmica do ambiente físico, tem acarretado sérios danos socioeconômicos e ambientais, observados principalmente nos centros urbanos. Nessas condições de ocupação mal ordenada, com a ocorrência de episódios pluviométricos intensos, em duração ou em distribuição, os processos na interface solo-atmosfera são deflagrados ou acelerados, acarretando diferentes tipos de impactos.

Os impactos são causados principalmente pela perda da estabilidade do maciço, dando origem a fenômenos como os de ruptura de encostas, subsidências, ou mesmo intensificando os processos erosivos. Outros problemas como assoreamentos e inundações também são recorrentes e agravam-se à medida que a paisagem humaniza-se.

Diante dos distintos problemas intrínsecos à degradação do meio físico, o comportamento dos solos não saturados tem despertado interesse na análise da interface solo-atmosfera, em particular nas regiões tropicais. Nessas regiões, os diferentes níveis de degradação são agravados principalmente devido a fatores internos, tais como as características do arranjo estrutural e a composição química e mineralógica do maciço, aliados a fatores externos ligados ao clima, como o nível e a distribuição das precipitações. Os fatores internos são resultantes do intemperismo, portanto relacionados às características climáticas do local. Cabe destacar que, embora o processo de intemperização dos maciços, principalmente o químico-mineralógico, seja lento, podem ocorrer alterações, em especial físico-estruturais, em curto intervalo de tempo, devido à antropização local ou mesmo regional.

Devido ao arranjo estrutural e à composição químico-mineralógica, os solos tropicais lateríticos apresentam comportamento hidromecânico peculiar. Em estreita relação com o grau de intemperismo, esses solos apresentam elevada porosidade, que se distribui entre os agregados, macroporosidade e, no interior deles, microporosidade, conferindo-lhes uma estrutura bimodal. Os agregados são ligados por pontes de argila ou ligações cimentícias de sesquióxidos de ferro e/ou alumínio (LIMA, 2003; CARDOSO, 2002).

Tendo em vista essas características físico-químicas, mineralógicas e estruturais, os fluxos de umidade determinam as condições de estado desses solos, pois, além de responderem por constantes variações no conteúdo de água dos poros do solo, proporcionando alterações

no estado de tensões, podem propiciar sua lixiviação e a consequente esqueletização do maciço. Nas regiões tropicais, as variações dos fluxos de umidade são sazonais e dependem, segundo Gitirana Jr. (2005), principalmente de três componentes: precipitação, evaporação e escoamento superficial. A esses fatores deve-se adicionar a evapotranspiração que, aliada aos dois primeiros citados pelo autor, ao afetarem a sucção atuante no solo, interferem diretamente no escoamento superficial, por causa da alteração gerada no gradiente hidráulico que condiciona a infiltração.

Ao considerar a variação nas condições de estado do solo, como a poropressão, a umidade e o índice de vazios, no entendimento da oferta e da demanda de umidade na fronteira solo-atmosfera, é necessária a compreensão dos fatores climáticos. O conhecimento das condições atmosféricas auxilia na análise da variação de umidade do solo, ao serem levados em conta os componentes relativos à precipitação total, à radiação solar, à velocidade dos ventos, à temperatura e à umidade relativa do ar.

Em função de características climáticas das regiões tropicais, sazonalidade da umidade, elevadas temperaturas e episódios pluviométricos rápidos e intensos, associados ainda às especificidades dos solos tropicais não saturados, o entendimento da variação sazonal da umidade se torna relevante, uma vez que o entendimento do comportamento dos solos parte da compreensão dos fluxos de umidade na interface solo-atmosfera. Nesse contexto, os eventos pluviométricos, principalmente os extremos, devem ser considerados não só quanto à intensidade, duração e frequência, mas também quanto ao estado do solo (grau de intemperização, umidade, porosidade e distribuição dos poros) e ao nível de antropização pelo qual tem passado o maciço.

2 Clima

Nimer e Brandão (1989) afirmam que as variações climáticas assumem importante papel nos estudos das complexas interações dos meios bióticos e abióticos, pois representam um fator ativo dessas relações, tanto como insumo de energia, quanto como regulador dos processos inerentes às referidas interações.

Nos estudos referentes aos processos hidrológicos, é relevante distinguir **tempo atmosférico** e **clima**. O tempo atmosférico refere-se às propriedades físicas que indicam o estado momentâneo da atmosfera de determinado lugar, com relação aos atributos do clima como temperatura do ar, pressão, umidade relativa e outros fenômenos meteorológicos. A caracterização do **clima** decorre da sucessão habitual dos diferentes tipos de tempo atmosférico em determinado lugar (SORRE, 1951), considerando tempo (cronológico), segundo Ayoade (1991), de no mínimo 30 anos.

A variação espacial e temporal dos elementos climáticos deve-se aos fatores do clima como latitude, relevo, vegetação, continentalidade/maritimidade e atividades humanas. Aos fatores do clima, asssociam-se os aspectos dinâmicos das correntes oceânicas, massas de ar e frentes que integrados, qualificam os distintos tipos de clima dos lugares (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Dentre os fatores relacionados às características microclimáticas, a energia solar incidente sobre uma superfície consiste na principal fonte de energia para os processos físicos

e químicos atuantes no maciço, como o aquecimento do ar e do solo e o fluxo da água e dos ventos que ocorrem na interface superfície/atmosfera (AZEVEDO *et al.,* 1990). Segundo Armani (2009), o ângulo de incidência dos raios solares em conjunto com as características do relevo, como declividade e orientação das vertentes, rege as características topoclimáticas do local. Esses fatores associados ainda à cobertura do solo justificam a variação espacial da temperatura e da umidade em escala microclimática.

Considerando os elementos climáticos, é importante conhecer o comportamento da precipitação pluvial em função da expressiva variabilidade espacial e temporal. Nos trópicos, as precipitações normalmente ocorrem de forma localizada, aleatória e com frequência sob a forma de pancadas de chuva, caracterizando momentos de chuvas intensas em pouco tempo (AYOADE, 1991). O comportamento da precipitação é analisado a partir da intensidade, podendo essa análise ser realizada diariamente ou em intervalos de tempo em hora e/ou minutos.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1999) classifica a intensidade dos episódios pluviométricos pelo volume de água que cai em uma unidade de tempo (Tabela 1). É preciso lembrar, no entanto, que o impacto dessas precipitações sobre a estabilidade do maciço depende, dentre outros fatores, do quanto e do como se processa a infiltração. A infiltração, por sua vez, está diretamente associada ao estado do solo no momento da precipitação ou quando da ocorrência de fluxo superficial. Essas características de estado vão desde a umidade até a distribuição da temperatura no solo.

Tabela 1. Classificação das chuvas segundo o grau de intensidade dos episódios (INMET, 1999).

Grau de intensidade da precipitação (mm)	**Característica do evento**
Chuva fraca	Precipitação entre 1,1 e 5 mm/h. As gotas de chuvas são destacadas; as superfícies secas levam cerca de dois minutos para umedecerem; fios de água nas sarjetas e ruas.
Chuva moderada	Eventos de chuvas entre 5,1 e 60 mm/h ou no máximo 6 mm em 10 minutos. Provocam esborrifos em contato com superfícies duras, escoamento das águas nas calhas do telhado em um terço a mais da metade de sua capacidade.
Chuva forte	Episódios acima de 60 mm/h ou 10 mm em 10 minutos. Chuvas torrenciais.

As Normais Climatológicas, critério estabelecido pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), unificam os procedimentos para realizar análises comparativas das características e variações climáticas dos diferentes lugares, sistematizando as informações meteorológicas por meio de valores médios dos atributos atmosféricos como temperatura do ar, precipitação, pressão, umidade do ar, considerando o período de 30 anos de observações. Molion (2006) adverte sobre a importância de se realizar análise do comportamento do clima considerando séries históricas mais longas. Segundo o referido autor, pesquisas que utilizam os dados das Normais Climatológicas, por exemplo, de 1931-1960 ou de 1961-1990 podem mascarar de-

terminadas variações climáticas naturais, as quais ocorrem como consequência da atuação de fenômenos naturais de longo prazo, tais como as Oscilações Decadal do Pacífico (ODP). Por outro lado, as médias dos atributos atmosféricos mascaram os eventos extremos.

Especificamente no que se refere ao conhecimento das características das precipitações, é relevante nas análises de infiltração considerar o comportamento dos eventos quanto a intensidade, duração e frequência. Entretanto, no Brasil, conhecer o comportamento dos eventos pluviométricos quanto à intensidade apresenta grandes obstáculos, devido à escassez dos registros de pluviógrafos. A escassez de dados climáticos completos no território brasileiro constitui-se em uma das principais dificuldades encontradas por pesquisadores. As estações são pontuais, e a regionalização dos dados é feita a partir da interpolação. Atualmente, os modelos têm avançando no sentido de que dados de sensores remotos oriundos de plataformas orbitais, aeronoves e balões, sejam utilizados na obtenção de informações usadas para a previsão do tempo e das catástrofes climáticas.

No Brasil, informações climáticas podem ser obtidas junto aos órgãos de abrangência nacional e estadual, como, por exemplo, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Sistema Meteorológico do estado do Paraná (SIMEPAR), Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia (EPAGRI/CIRAM), Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI/UNICAMP), Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEGO).

2.1 Interface solo e clima nas regiões tropicais

Os solos tropicais recobrem cerca de 65% do território brasileiro. São altamente intemperizados. Seu comportamento mecânico e hidráulico peculiar apresenta conformidade com o grau de intemperismo ao qual foi submetido. Nas regiões tropicais, do manto de cobertura até a profundidade da franja capilar, estão geralmente presentes os solos não saturados. O fato de os solos tropicais intemperizados encontrarem-se, na maioria das vezes, na condição não saturada contribui ainda mais para certas particularidades inerentes ao seu comportamento. Para Fredlund e Rahardjo (1993), o comportamento hidromecânico dos solos não saturados pode ser considerado como função das condições na interface solo e atmosfera. As condições atmosféricas respondem por variações no conteúdo de água dos poros, influenciando o seu comportamento mecânico e hidráulico.

As propriedades físico-químicas, mineralógicas e estruturais dos solos tropicais não saturados apresentam estreita relação com o movimento da água no solo por meio do fluxo ascendente, representado pelos processos de evaporação e/ou evapotranspiração e do fluxo descendente, o qual ocorre a partir de diferentes formas de precipitação e é representado pela infiltração. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), a variação dos fluxos de umidade determina as condições de poropressão no solo e correspondem às variações sazonais decorrentes das condições atmosféricas. No caso de regiões de clima tropical, situação comum no

Brasil, o regime pluviométrico costuma combinar uma estação chuvosa seguida por outra com escassos eventos de precipitação.

A caracterização completa da interação solo-atmosfera deve incluir o estudo do fluxo interno no solo (NOGUEIRA, 2005). Conforme Gitirana Jr. (2005), esse fluxo é representado pelos fluxos de água líquida, de vapor de água, de ar e de calor nos solos e estão diretamente relacionados às taxas de evaporação e infiltração. Em solo não saturado, o ar ocupa os vazios não ocupados pela água, diminuindo o espaço disponível para o seu fluxo. De acordo com Feuerharmel *et al.* (2007), o fluxo em um solo não saturado representa um exemplo de fluxo multifásico, onde as fases água e ar coexistem nos poros do solo e podem ser classificados como fluidos.

O movimento desses dois fluidos depende do grau de saturação e da sucção do solo. Diante do decréscimo da quantidade de água, a seção de fluido nos vazios se torna progressivamente menor, podendo, a partir de certo ponto no processo de secagem, interromper a continuidade entre as partículas e, nesse ponto, a permeabilidade ser considerada praticamente nula. Nos solos argilosos, essa interrupção dificilmente se dá, e o fluxo da fase líquida se processa em função da diferença de energia entre as forças de adsorção que ligam o mineral à água e às energias oriundas da atmosfera, tais como vento e temperatura. Na interface, seja interna, seja externa ao maciço, a água passa geralmente à condição de vapor, proporcionando a precipitação dos elementos e compostos solúveis nela presentes.

Quando a fase ar é contínua no solo, o que ocorre para maiores valores de sucção, a lâmina d'água do fluxo superficial sobre o maciço tende a sofrer inicialmente uma rápida infiltração. O fluxo é geralmente amortecido e interrompido logo em seguida pela frente de ar que se forma. Nessa situação, a fase ar colocada sob pressão positiva tende a provocar o desprendimento de partículas e agregados, em um processo de ruptura localizada do solo. Para Camapum de Carvalho *et al.* (2006), esse processo constitui-se em uma das causas de deflagração do processo erosivo.

Considerando a estreita relação na interface solo-atmosfera no comportamento hidromecânico dos solos tropicais não saturados, a capacidade de infiltração constitui-se em uma importante propriedade do solo na análise da quantidade de água de escoamento superficial (MOTA *et al.*, 2007). O conhecimento do processo de infiltração da água pluvial no solo se torna relevante tanto por fornecer subsídios para o dimensionamento de estruturas de controle de erosão e de inundação, quanto para deliberar práticas de uso e manejo do solo.

O comportamento dos solos tropicais quanto à infiltração é influenciado pela estrutura marcada pela porosidade e distribuição dos poros em macro e microporos, pelo grau de saturação inicial e pela sucção correspondente. Sob a condição de não saturação, o solo com a fase ar descontínua faz com que as bolhas oclusas atuem inibindo o fluxo de água. Quando há presença de uma lâmina d'água de infiltração sendo a fase ar contínua, a fase ar tende, após comprimir-se, a atuar como uma barreira ao fluxo. Assim, a infiltração depende basicamente da água disponível, da natureza do solo, do estado da superfície desse solo e da quantidade de água e ar, inicialmente presentes no interior do maciço (SILVEIRA *et al.,* 2004). Acrescentam-se a esses fatores as condições ambientais de campo, dadas pela morfologia do terreno, pelas condições atmosféricas na interface solo-atmosfera, pela cobertura do solo e pela fauna que, algumas vezes, cria caminhos preferenciais de fluxo de água.

3 Análise sazonal da umidade e a influência no comportamento hidráulico dos solos

3.1 Características geoambientais do Município de Goiânia/GO

Luiz (2012), ao estudar a influência da variação do clima no comportamento sazonal da umidade dos solos e sua influência no comportamento hidráulico, relacionou atributos climáticos e características geotécnicas à variação sazonal da umidade, sucção e infiltração. Nesse trabalho, foi feita uma análise das propriedades dos solos tropicais não saturados na interface solo-atmosfera. O estudo envolveu a seleção de 11 pontos distribuídos na região norte e sul de Goiânia, conforme Figura 1.

A geologia da área de estudo é representada pelo Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu, na porção norte e pelo Grupo Araxá, na porção sul (CAMPOS *et al.*, 2003). O relevo da região é marcado por formas suave/onduladas, e as declividades são preferencialmente inferiores a 11%. Em relação à orientação das vertentes, há o predomínio das faces voltadas para o norte, aproximadamente 46%. Em seguida, tem-se 30% das vertentes voltadas para o sul, 13% para o leste e 12% para o oeste (LUIZ, 2012).

Quanto às características do solo, Campos *et al.* (2003) os classificaram como Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Nitossolo Vermelho (NV), Chernossolo Háplico, Cambissolo Háplico (Cb), Plintossolo Pétrico, Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico e Gleissolo. A vegetação natural original do Município de Goiânia era constituída por floresta, savanas (Cerrado) e áreas de transição (CAMPOS *et al.*, 2003). Os perfis de solos estudados estão inseridos nesse contexto geoambiental, em áreas de baixas declividades, solos do tipo Latossolos Vermelho-Amarelho, coberturas do solo por pastagens do tipo braquiaria e cobertura vegetal natural.

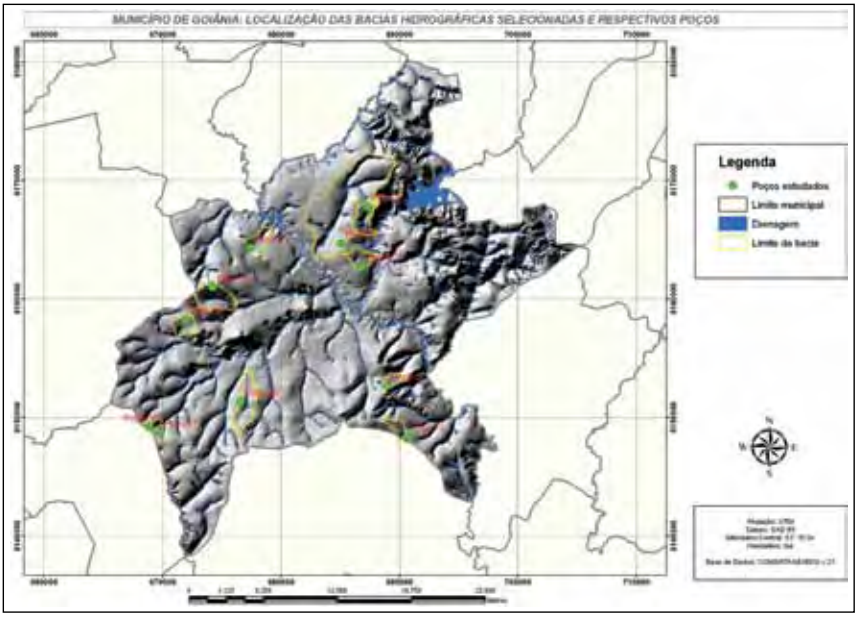


Figura 1. Município de Goiânia/GO e a localização dos perfis de solos estudados (LUIZ, 2012).

As características climáticas de Goiânia resultam da relação entre a atuação dos sistemas atmosféricos individualizados como massas de ar, com os aspectos físicos-geográficos (Tabela 2). A maior oferta pluviométrica ocorre de dezembro a março, com média mensal entre 220 e 270 mm; nos meses mais secos, junho, julho e agosto, a precipitação média mensal é inferior a 12 mm. Esse mesmo período apresenta baixos índices de umidade relativa do ar, valores inferiores a 20%. As temperaturas mais elevadas ocorrem nos meses de setembro, outubro e novembro, com médias mensais entre 29 e 32 °C, e os meses mais frios são junho e julho, com médias entre 16 e 18 °C.

Tabela 2. Principais sistemas atmosféricos atuantes na região de Goiânia e seus efeitos nas características do clima (LUIZ, 2012).

Sistema Atmosférico	Origem	Período/ano	Efeitos
mTa	SE/E	Ano todo	Estabilidade atmosférica; estiagem prolongada no outono e no inverno.
mTc	NW	Verão	Elevação da temperatura; ocorrência dos veranicos.
mEc	NW/N	Primavera e Verão	Instabilidade atmosférica; precipitação convectiva.
mPa	SE/E	Inverno e Primavera	Diminuição da temperatura; precipitação frontal.
ZCAS	NW/SE	Verão	Intensificação das chuvas: convectiva e frontal.

3.2 Variação no comportamento da precipitação, da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e da temperatura aparente da superfície

O solo apresenta uma estreita relação com as características climáticas do local. Nessa perspectiva, Luiz (2012) analisou as condições climáticas de Goiânia considerando as variações anual e sazonal dos atributos atmosféricos a partir da dinâmica regional da atmosfera, associados aos fatores físico-geográficos.

Uma segunda escala de análise, a local, permitiu a integração dos fatores topoclimáticos, com a cobertura do solo, justificando o comportamento microclimático de lugares específicos do terreno (GEIGER, 1990). A radiação solar, a orientação da vertente, a declividade, ventos e o uso e ocupação do solo constituem fatores do clima que alteram o fluxo radioativo da superfície, influenciando na variação temporal e espacial da temperatura de superfície do terreno e, consequentemente, na variação da umidade do solo em perfil e em planta.

3.2.1 Análise da variação e tendência dos atributos climáticos precipitação do ar, temperatura e umidade relativa do ar: série histórica 1961 a 2008

Foram analisados os atributos atmosféricos quanto à variabilidade e tendência temporal da precipitação acumulada em 24h, temperatura média do ar (máxima e mínima) e umidade

relativa média do ar. Para tanto, considerou-se a série histórica de 1961-2008, do 10° DISME (Distrito de Meteorologia), cedidas pelo INMET.

a) Precipitação

Os elementos atmosféricos atuantes na região de Goiânia obedecem ao controle da radiação de localidades tropicais respeitando sua localização (latitude) e à dinâmica regional das massas de ar atuantes na América do Sul. Os fatores geográficos locais, como altitude e relevo, são pouco significativos, devido à configuração de formas plana a suavemente ondulada. A continentalidade representa o fator influenciador na amplitude térmica e na variabilidade das precipitações.

O comportamento interanual da pluviometria para a cidade de Goiânia mostra uma expressiva variabilidade interanual, com extremo chuvoso em aproximadamente 2000 mm e seco em 1050 mm. A sazonalidade climática de Goiânia é atribuída à distribuição anual dos eventos pluviométricos. Os trimestres relativos às estações primavera-verão indicam a concentração dos episódios chuvosos, enquanto os trimestres outono-inverno caracterizam o período de menor oferta pluviométrica. Na linguagem popular, esses períodos são denominados, respectivamente, período chuvoso e período seco.

Como pode ser observado na Tabela 3, os episódios pluviométricos acumulados em 24 horas com intensidades de até 25 mm representaram de 84 a 98% das precipitações ao longo do ano. A pluviometria no intervalo entre 25 e 50 mm mostrou ser mais expressiva para os meses de outubro a abril, correspondendo de 11 a 13% das chuvas.

Tabela 3. Número de ocorrências dos eventos pluviométricos acumulados em 24 horas em Goiânia/GO (série histórica: 1961 a 2008) (LUIZ, 2012).

Meses	Total de Eventos	0,1 |— 24,9		25 |— 49,9		50 |— 74,9		75 |— 99,9		100 |— 124,9		125 |— 150	
		Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%
Jan	1041	875	84,05	137	13,16	22	2,11	6	0,58	1	0,10	0	0,00
Fev	910	782	85,93	102	11,21	25	2,75	0	0,00	1	0,11	0	0,00
Mar	878	742	84,51	99	11,28	27	3,08	10	1,14	0	0,00	0	0,00
Abr	499	423	84,77	62	12,42	13	2,61	1	0,20	0	0,00	0	0,00
Mai	196	182	92,86	10	5,10	4	2,04	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Jun	57	51	89,47	6	10,53	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Jul	55	54	98,18	1	1,82	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ago	90	85	94,44	5	5,56	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Set	311	286	91,96	21	6,75	3	0,96	1	0,32	0	0,00	0	0,00
Out	672	567	84,38	81	12,05	20	2,98	2	0,30	1	0,15	1	0,15
Nov	889	754	84,81	100	11,25	32	3,60	3	0,34	0	0,00	0	0,00
Dez	1046	897	85,76	115	10,99	28	2,68	4	0,38	0	0,00	2	0,19

Mesmo representando uma frequência menos significativa quando comparada com o intervalo de até 25 mm, é importante considerar os episódios pluviométricos acumulados acima dessa intensidade. Esses episódios ocorrem, por vezes, no momento em que os solos estão mais úmidos, com menor capacidade de infiltração e armazenamento e, mesmo com menor ocorrência no ano, potencializam processos erosivos, enchentes, alagamentos, inundações e deslizamentos de encostas, principalmente ao longo dos canais de drenagem, por apresentarem fundos de vale encaixados.

Os volumes de precipitação diária superiores a 50 mm apresentam frequência baixa. Contudo, não se pode deixar de atribuir importância a esses episódios, uma vez que eventos de 60 mm/hora são considerados intensos (INMET, 1999). Por outro lado, considerando o

caráter de tropicalidade da região de Goiânia, eventos dessa magnitude podem ocorrer em período de tempo curto. Mesmo que eventos pluviométricos de 60 mm ocorram distribuídos em 24h, segundo Sant'Anna Neto (1998), já representam possibilidades de transtornos no cotidiano da população urbana.

A Tabela 4 apresenta os intervalos de intensidade da precipitação anual, na identificação de anos-padrão, de forma a caracterizar os anos como extremo chuvoso e seco ou mesmo normal.

A identificação de anos-padrão a partir dos extremos positivos ou negativos é relevante quando se levam em consideração os aspectos geotécnicos, pois conhecer essa variação é uma maneira de oferecer subsídios aos estudos de estabilidade dos maciços. A partir das condições de infiltração do solo relacionado com a variação interanual, sazonal e distribuição mensal, considerando tanto as intensidades quanto a distribuição, avaliam-se os diferentes níveis potenciais de instabilidade de determinado maciço. Essas análises devem buscar considerar os eventos já ocorridos para que se entenda o comportamento do meio físico e se possa atuar preventivamente em relação a possíveis eventos futuros.

Tabela 4. Anos-padrão: série histórica 1961 a 2008-Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

Muito Seco (MS)	=	$Xi \leq Q(0,15)$	→	$Xi \leq 1367,65mm$
Seco (S)	=	$Q(0,15) < Xi \leq Q(0,35)$	→	$1367,65mm < Xi \leq 1541,58mm$
Normal (N)	=	$Q(0,35) < Xi < Q(0,65)$	→	$1541,58mm < Xi < 1672,29mm$
Chuvoso (C)	=	$Q(0,65) \leq Xi < Q(0,85)$	→	$1672,29mm \leq Xi < 1765,58mm$
Muito Chuvoso (MC)	=	$Xi \geq Q(0,85)$	→	$Xi \geq 1765,58mm$

Onde: Q = valores estimados de precipitação para os Quantis (0,15; 0,35.; 0,65 e 0,85).
Xi= intervalo de valores de precipitação.

b) Temperatura

Quanto à temperatura do ar, os valores mais elevados ocorrem nos meses de setembro, outubro e novembro, com médias entre 29 e 31°C. Os meses mais frios correspondem a junho e julho, com médias entre 13 e 18°C (IBGE, 1999). Luiz (2012) indicou, para temperatura média máxima ($T_{máx.}$), variação interanual entre 28 e 32,1°C; para a temperatura média mínima ($T_{mín}$), entre 16 e 19,3°C, e para temperatura média compensada (T_{comp}), entre 22 e 25°C.

A tendência de elevação dos valores ocorreu principalmente a partir de 1975 e, de forma mais expressiva, a partir de 1998 (Figura 2). A tendência positiva para os valores da temperatura do ar (máxima e mínima) apontou, respectivamente, para acréscimo de 2 e 2,4°C no outono e no inverno, enquanto na primavera e no verão, para acréscimo de 1,2 e 0,8°C. Além do aumento de temperatura propriamente dito, essa tendência indica a possibilidade de que esteja havendo registros com menores amplitudes térmicas, o que implica considerar que as temperaturas tendem a se manter mais elevadas por mais tempo ao longo do dia.

Essa situação pode se mostrar mais acentuada no final do inverno e durante a primavera, quando a cidade de Goiânia encontra-se sob influência da massa de ar Tropical Atlântica (Ta). A garantia da estabilidade atmosférica, a baixa velocidade dos ventos e a elevação da altura do ângulo solar implicam o aumento das temperaturas, que ficam na dependência do retorno das chuvas na primavera, para amenizar as condições estabelecidas pelo período de estiagem.

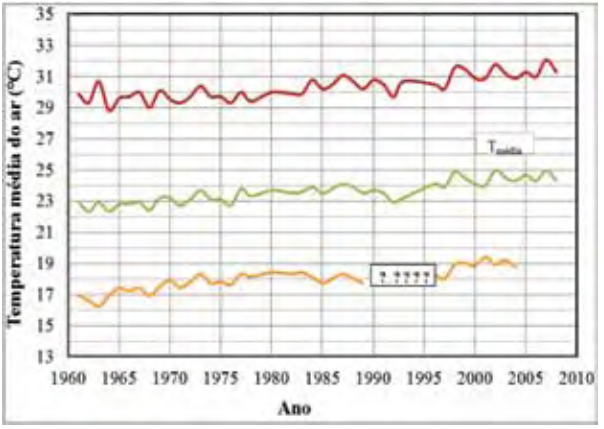


Figura 2. Temperatura média máxima, mínima e compensada do ar (°C): série histórica 1961 a 2008 – Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

Quanto ao impacto na capacidade de infiltração, espera-se que o aumento da temperatura proporcione a maior perda de umidade no solo e, por consequência, maior sucção, implicando, assim, maior gradiente de energia, taxa de infiltração e capacidade de armazenamento.

c) Umidade relativa do ar

Segundo o IBGE (1999), durante o período de estiagem os valores da umidade relativa do ar podem atingir índices inferiores a 20%. Ao considerar a componente sazonal, a média aponta para elevada variabilidade, conforme pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 5. Média e variação sazonal dos índices de umidade relativa do ar (%): série histórica 1961 a 2008 – Goiânia/GO (LUIZ,2012).

Estação do ano	Média (%)	Variação (%)
Primavera	68,02	58,69 a 78,01
Verão	74,82	69,26 a 82,68
Outono	65,45	57,22 a 72,81
Inverno	49,31	41,27 a 56,10

O comportamento do atributo umidade relativa do ar indicou tendência de variação negativa nos valores, o que se encontra em conformidade com as modificações térmicas, pois a umidade relativa do ar tende a diminuir com o aumento da temperatura do ar. A diminuição nos índices de umidade relativa do ar foi observada tanto para a série interanual quanto para as estações do ano. Ao longo dos 48 anos, a diminuição foi em torno de 6,9%, ocorrendo principalmente para os períodos de outono, inverno e primavera. Considerando-se a relação solo-atmosfera, os baixos índices de umidade relativa do ar tendem a aumentar os processos de evapotranspiração e, consequentemente, as maiores perdas da umidade dos solos. Com isso, tem-se maior sucção, maior gradiente de energia e expectativa de maior taxa de infiltração e capacidade de armazenamento.

As tendências indicadas para os atributos do clima precipitação, temperatura do ar e umidade relativa do ar, analisados a partir da série histórica de 1961 a 2008, Luiz (2012) aponta para a importância que os fenômenos de escala local, como consequência da ocupação humana, assim como a dinâmica regional das massas de ar, adquirem nas análises do comportamento dos atributos climáticos. Afirma que, mediante o comportamento desses atributos climáticos, a cidade de Goiânia apresentou, para a primavera, o outono e o inverno, variações mais expressivas.

Essas variações indicam a diminuição do número de chuvas acima de 40 mm na primavera. Indicam também tendências positivas nos valores da $T_{máx.}$ e da $T_{mín.}$ para a primavera, o outono e o inverno, associados à tendência negativa significativa nos valores da umidade relativa do ar.

Mediante essas variações, é possível considerar que, em Goiânia, existe uma forte tendência para a antecipação do período seco no outono e o seu prolongamento durante a estação da primavera, apontando para o prolongamento do período seco no decorrer do ano. Esse aspecto, associado à tendência de elevação da temperatura do ar e às baixas amplitudes térmicas, pode contribuir para precipitações mais intensas no período chuvoso como forma de equilíbrio. Nesse sentido, a maior taxa de infiltração e capacidade de armazenamento oriundo da perda de umidade do solo devido à atuação de temperaturas mais elevadas é compensada pelo maior volume de água precipitado. Cabe lembrar que a fase ar contínua pode atuar bloqueando a infiltração, gerando maior fluxo superficial quando ocorrem precipitações mais intensas.

3.2.2 Análise da variação da temperatura aparente da superfície do terreno: inverno/2010

Por meio de modelos obtidos a partir de imagens termais (Landsat-5), Luiz (2012) analisou, para o inverno do ano de 2010, a variação espacial e temporal da dinâmica da temperatura de superfície no município de Goiânia nos dias 12/07 e 29/08, conforme pode ser observado a partir das Figuras 3 e 4.

As áreas periurbanas são configuradas como áreas mais aquecidas que aquelas próximas ao próprio sítio urbano, principalmente na porção norte e oeste do município. Esse fato evidencia o papel do solo exposto e das áreas de pastagem na elevação da temperatura aparente das superfícies, por apresentarem elevado albedo e baixa inércia das superfícies de solo exposto e seco, como citam Imamura-Bornstein (1991) e Mendonça (1995).

A partir das Tabelas 6 e 7, é possível observar que a variação de umidade entre os dois momentos influencia sobremaneira a variação da temperatura, expressa tanto pela amplitude térmica apresentada para os dois períodos, de até 29°C para o dia 12/07 e de até 36,4°C para o dia 29/08, quanto pelo aumento em área de superfícies com temperaturas mais elevadas. Dentre os fatores que justificam os valores mais elevados da temperatura aparente da superfície para o dia de 29/08 estão a variação sazonal do ângulo solar e as perdas de umidade das superfícies. A variação do ângulo solar associada às condições atmosféricas atuantes no momento favoreceu o aumento da temperatura da superfície, principalmente para as áreas correspondentes a pastagem e solo exposto, e consequentemente maiores perdas da umidade.

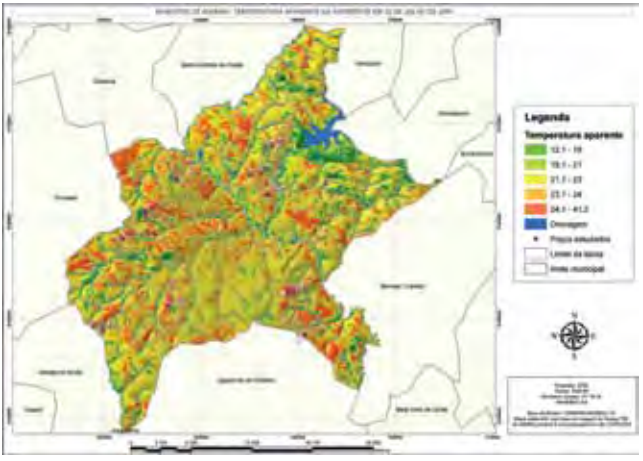


Figura 3. Temperatura aparente da superfície (°C): Goiânia/GO-12/07/2010 (LUIZ, 2012).

Tabela 6. Coincidência espacial entre uso e cobertura do solo com a temperatura aparente da superfície do terreno (°C): Goiânia/GO-12/07/2010 (LUIZ, 2012).

Temperatura aparente da superfície (°C)	Área por classe de uso e cobertura do solo (%)					
	Área urbana	Solo exposto	Vegetação natural	Agricultura	Pastagem	Drenagem
12 – 19	0,24	0,49	5,86	0,25	0,22	0,79
19,1 - 21	1,98	2,35	8,45	1,39	1,46	0,46
21,1 - 23	21,36	10,2	7,31	3,34	7,38	0,26
23,1 - 24	6,76	3,46	0,84	0,49	1,73	0,03
24,1 - 41	5,75	4,85	0,73	0,22	1,33	0,02

As superfícies com cobertura de vegetação natural são inversamente proporcionais à temperatura. As superfícies do terreno identificadas com temperaturas mais elevadas correspondem às áreas urbanas, ao solo exposto, à agricultura e à pastagem.

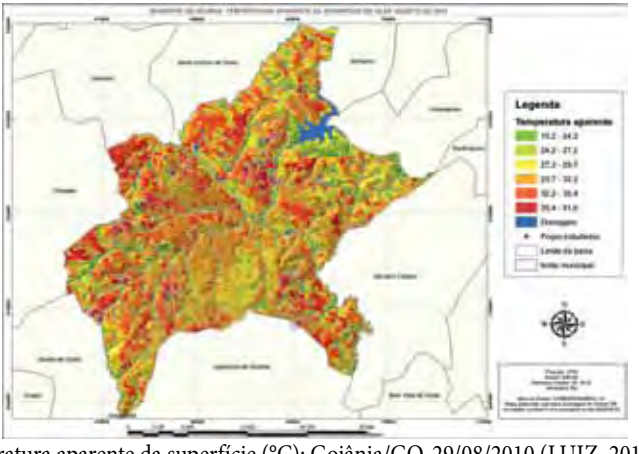


Figura 4. Temperatura aparente da superfície (°C): Goiânia/GO-29/08/2010 (LUIZ, 2012).

As temperaturas com menores valores estão associadas principalmente às superfícies com vegetação natural, observadas com maior expressão na porção nordeste do município. Observam-se pequenas manchas no sítio urbano na amenização da temperatura de superfície, representadas pela presença dos parques, indicando o *efeito oásis* (MENDONÇA, 2009). Esse fato ocorre em função da maior capacidade de absorção da energia incidente sobre a cobertura de vegetação natural, quando comparada com as áreas mais fortemente afetadas pela ação humana.

Tabela 7. Coincidência espacial entre uso e cobertura do solo com a temperatura aparente da superfície do terreno (°C) – Goiânia/GO-29/08/2010 (LUIZ,2012).

Temperatura aparente da superfície (°C)	Área por classe de uso e cobertura do solo (%)					
	Área urbana	Solo exposto	Vegetação natural	Agricultura	Pastagem	Drenagem
15,2 – 24.2	0,08	0,18	2,33	0,10	0,08	0,66
24,3 – 27,2	0,93	1,19	7,99	0,81	0,73	0,43
27,3 – 29,7	8,77	4,21	7,64	2,31	3,42	0,34
29,8 – 32,2	18,97	7,95	3,71	1,82	5,41	3,71
32,3 – 35,4	6,33	5,75	1,22	0,48	2,01	0,02
35,5 – 51,6	1,00	2,08	0,29	0,19	0,44	0,01

As temperaturas intermediárias estão relacionadas principalmente às coberturas do sítio urbano. O fato de o centro mais densamente edificado apresentar temperaturas inferiores em relação às áreas periurbanas é justificado pela influência do efeito de sombreamento das áreas edificadas (*sky view factor*) (BRANDÃO, 1996); pela orientação das ruas, que determina tanto a quantidade de energia incidente quanto correntes de ventos que criam caminhos preferenciais segundo o sistema de arruamento e, também, pelo *efeito oásis/efeito park* (IMAMURA-BORNSTEIN, 1991; MENDONÇA, 2009). Nesse sentido, tem-se que o traçado urbano pode ser explorado como elemento interveniente na temperatura ambiente local.

Ao estabelecer comparação para o Município de Goiânia entre a temperatura aparente da superfície do terreno com a orientação das vertentes (Tabela 8 e 9), verificou-se que as temperaturas mais elevadas ocorrem, principalmente, nas vertentes orientadas para norte, nordeste, noroeste e leste e, com menor expressão, em ordem decrescente, nas vertentes voltadas para sudeste, oeste, sul e sudoeste.

Tabela 8. Coincidência espacial entre orientação das vertentes com a temperatura aparente da superfície do terreno (°C) – Goiânia/Go-12/07/2010 (LUIZ, 2012).

Temperatura	Orientação das vertentes (área %)							
da superfície (°C)	Norte	Nordeste	Noroeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste
12,1 - 19	0,94	0,72	1,14	0,72	0,93	1,10	1,17	1,86
19,1 - 21	2,22	1,64	2,44	1,52	1,82	1,95	2,14	2,35
21,1 - 23	7,54	6,39	7,81	6,07	5,91	4,80	5,06	6,26
23,1 - 24	2,88	2,82	1,77	2,14	1,25	0,71	0,71	1,03
24,1 – 41	2,72	3,10	1,66	2,23	1,11	0,67	0,55	0,87

As temperaturas de superfícies indicando valores mais elevados e apresentando coincidência espacial principalmente com as superfícies cuja orientação são voltadas para o quadrante norte (N), encontram-se relacionadas com a cobertura do solo, especificamente aquelas com pastagem e solo exposto. A análise temporal ressalta o papel da sazonalidade climática de Goiânia e a variação da umidade do solo.

Tabela 9. Coincidência espacial entre orientação das vertentes com a temperatura aparente da superfície do terreno (°C): Goiânia/Go em 29/08/2010 (LUIZ, 2012).

Temperatura	Orientação das vertentes (área %)							
da superfície (°C)	Norte	Nordeste	Noroeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste
15,2 – 24,2	0,40	0,33	0,44	0,36	0,52	0,46	0,50	0,43
24,3 – 27,2	1,41	1,27	1,63	1,26	1,55	1,64	1,64	1,67
27,3 – 29,7	3,59	2,76	4,31	2,74	3,17	2,95	3,27	3,91
29,8 – 32,2	6,93	6,45	5,77	5,21	3,92	2,92	2,84	3,93
32,3 – 35,4	3,03	3,06	2,15	2,45	1,51	1,05	1,18	1,38
35,5 – 51,6	0,95	0,80	0,54	0,65	0,36	0,19	0,19	0,33

Os estudos microclimáticos em solos tropicais permitem a caracterização da temperatura na fronteira solo-atmosfera. Esse atributo constitui-se em importante parâmetro na análise do comportamento dos solos tropicais quanto à variação do perfil de umidade. Sua importância é evidenciada principalmente quando se considera o nível de intervenção antrópica e a alteração do balanço de energia entre a superfície e a atmosfera, intrínseco a essas intervenções.

3.3 Caracterização químico-mineralógica e geotécnica dos perfis de solos estudados

As propriedades químico-mineralógicas e geotécnicas dos perfis de solos estudados, bem como o comportamento sazonal da infiltração foram realizados até 3 m de profundidade, pois, de um modo geral, a zona ativa de interação com a atmosfera se limita regionalmente a essa cota. Para o poço 1, no entanto, o estudo foi feito até a profundidade de 4 m. A apresentação e discussão dos resultados contemplaram a divisão do Município de Goiânia entre porção norte e porção sul. Essa divisão obedeceu unicamente à influência da litologia predominante na região, uma vez que a região norte é dominada por rochas granulíticas e a região sul por rochas xistosas e quartizíticas.

Considerando as regiões norte e sul de Goiânia sob influência, respectivamente, dos granulitos e das rochas xistosas e quartizíticas, as análises químicas indicaram solos ácidos e altamente lixiviados. Foram encontrados valores negativos de ΔpH (ΔpH = pH em água - pH em KCL) até 2 m de profundidade, o que pode estar associado a uma possível deposição do solo advindo de montante dos perfis estudados.

As análises mineralógicas indicaram solos com quantidades expressivas de óxidos e óxido-hidróxidos de Al e Fe, o que confere estágio avançado de evolução dos perfis estudados, com o predomínio da gibbsita seguida da caulinita, da hematita e da goethita. Entretanto, a presença de minerais do tipo 2:1 nos Poços 3, 5 e 7 indicaram, ao longo do perfil, camadas constituídas por solos menos evoluídos, evidenciando intemperismo diferenciado.

Os óxidos e óxi-hidróxidos de ferro e alumínio possuem propriedades cimentantes, desempenhando importante papel na formação dos agregados, o que é observado na análise granulométrica.

Nas análises granulométricas, a comparação estabelecida entre os resultados dos ensaios realizados com e sem o uso de defloculante indicaram solos com elevado nível de agregação. Os valores médios para a fração argila ocorrem entre 50 e 70%; para a fração silte, entre 14 e 19%; para a areia média, entre 6 e 15%, e para a areia fina, entre 2 e 7%. A fração argila encontra-se agregada principalmente na fração areia média e areia fina, o que permite inferir sobre a possibilidade de desegregação não só do silte em argila, como também da fração de areia em silte mais argila. Permite inferir, ainda, que os agregados de argila encontram-se no estado natural compondo as frações silte e areia.

Esse aspecto implica considerar que os solos analisados apresentam características bimodais de distribuição de poros, sendo estes compostos por microporos e macroporos. É possível também inferir que os mantos de intemperismo apresentam comportamentos quanto a permeabilidade e fluxo semelhantes às areias, embora, muitas vezes, considerando-se aspectos mineralógicos ou a matriz na forma desagregada, trate-se de uma argila ou de solos predominantemente argilosos.

Quanto à avaliação das propriedades geotécnicas (Tabela 10), o peso específico dos grãos (γ_s) apresentou valores mais expressivos para os poços inseridos na porção norte. As variações dos índices de vazios (e) situam-se entre 0,920 e 2,785, com diferenças que ocorrem tanto entre os poços como ao longo dos perfis com a profundidade.

Tabela 10. Propriedades geotécnicas do perfis de solos estudados: Goiânia/GO.

Poços	Prof.(m)	γ_{nat}	γ_d	γ_s	e	n	Sr
		(kN/m3)	(kN/m3)	(kN/m3)		(%)	(%)
	1,0	14,65	11,39	29,54	1,594	61	53
2	2,0	14,71	11,49	29,71	1,587	61	52
	3,0	16,19	12,30	29,93	1,433	59	66
	1,0	14,60	11,76	30,27	1,574	61	43
3	2,0	18,21	15,43	29,75	0,928	48	58
	3,0	16,91	13,59	30,49	1,243	55	60
	1,0	14,31	11,49	28,63	1,492	60	48
4	2,0	14,22	11,84	28,74	1,427	59	42
	3,0	17,72	14,62	28,62	0,958	49	66
	1,0	14,29	11,60	27,72	1,390	58	46
5	2,0	14,64	12,11	27,91	1,301	57	47
	3,0	10,64	9,09	28,24	2,107	68	23
	1,0	*	*	26,72	*	*	*
7.1	2,0	*	*	26,89	*	*	*
	3,0	*	*	27,11	*	*	*
	1,0	13,54	11,00	27,35	1,487	60	43

(continuação)

Poços	Prof.(m)	γ_{nat}	γ_d	γ_s	e	n	Sr
		(kN/m3)	(kN/m3)	(kN/m3)		(%)	(%)
8	2,0	14,03	11,23	28,19	1,511	60	47
	3,0	14,63	11,50	28,42	1,472	60	53
	1,0	14,04	11,28	27,53	1,441	59	47
10	2,0	14,37	11,31	27,85	1,438	59	52
	3,0	17,65	14,29	27,43	0,920	48	70

(*) Ausência de informações. Fonte: modificada Luiz (2012).

De um modo geral, esses valores podem ser considerados elevados e o perfil de solo como dotado de elevada capacidade de infiltração. Essas variações ocorrem principalmente na porção norte de Goiânia, onde é apresentada sutil tendência de diminuição nos valores obtidos para as maiores profundidades (3 m). Para a propriedade grau de saturação (Sr), os perfis dos solos estudados indicaram variações dentro do intervalo de 42 a 76%. Esses valores de grau de saturação apontam para elevada capacidade de armazenamento.

Os resultados obtidos para os limites de consistências (w_L e w_p) e para o índice de plasticidade (IP) indicaram w_L entre 33 e 50%, w_p entre 20 e 36% e IP entre 8 e 18%. A classificação MCT expedita dos perfis de solo identificou, em sua maioria, solos tipo LG', LA' e LA'-LG', o que indica solos argilosos de comportamento laterítico e solos arenosos de comportamento laterítico.

Se calculados os teores de umidade correspondentes à saturação do solo em estado natural, percebe-se que muitos deles são superiores aos teores de umidade correspondentes ao limite de liquidez, o que confere ao solo fluidez em caso de ruptura estrutural em estado saturado.

3.4 Variação sazonal da umidade do solo

A região de Goiânia apresenta forte sazonalidade com tendência ao prolongamento do período seco no decorrer do ano, associada a elevadas temperaturas do ar e a baixos índices de umidade relativa do ar. Essas condições, associadas aos valores indicados para a temperatura aparente de superfície durante o período mais seco e a baixa velocidade dos ventos, favoreceram as perdas de umidade do solo.

Considerando os meses de janeiro, abril, julho e período final do mês de agosto e início do mês de setembro (doravante agosto-setembro) do ano de 2010, foi observado, nos diferentes pontos de análise, o aumento da umidade do solo superficial. Entre os meses de julho e início do mês de setembro de 2010, para todos os poços, ocorreram as maiores perdas de umidade ao longo dos perfis.

No mês de julho, medidas obtidas *in situ* indicaram valores para a temperatura do ar entre 22 e 32°C e umidade relativa do ar entre 26 e 58%. Em agosto-setembro, essas medidas indicaram para a temperatura do ar valores entre 23 e 41°C e para a umidade relativa do ar entre 10 e 56%, com predomínio de índices abaixo de 20%.

A partir da Figura 5, observa-se a variação da umidade entre os períodos de janeiro e agosto-setembro de 2010 para os mesmos horizontes dos diferentes perfis estudados. A análise aponta para a profundidade de 1 m como sendo a camada que apresentou, entre os meses de janeiro e agosto-setembro, as maiores diferenças de umidade, entre 6 e 14%. O Poço 8 excepciona esse comportamento ao indicar que as maiores perdas para o respectivo período ocorreram em 3 m de profundidade.

Figura 5. Diferença sazonal de umidade (w_{nat}) entre os meses de janeiro e agosto-setembro de 2010: perfis situados nas regiões norte e sul de Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

Para o horizonte de 2 m, as variações das umidades indicadas para o período entre janeiro e agosto-setembro incidiram perdas de 3 a 10%, exceto para o Poço 3, o qual indicou variação no período de apenas 0,21%. Para 3 m de profundidade, as perdas mais expressivas de umidade entre janeiro e agosto-setembro podem ser observadas, para os perfis representativos dos Poços 7.1 e 8, respectivamente, 12 e 8%.

As maiores diferenças indicadas para o Poço 7.1 em 2 e 3 m de profundidade pode ter relação com o fato de que esse poço encontra-se inserido em uma região cuja geomorfologia regional indica área de Chapadas, com consideráveis níveis de concrecionamento, referenciada por Casseti (1992) como uma área de recarga.

A Figura 6 apresenta a análise das diferenças nos valores de umidade especificamente no perfil, entre os horizontes 1 e 3 m, considerando os distintos momentos do ano de 2010. Observa-se uma tendência de aumento nas diferenças de umidade ao longo do perfil, conforme se aproximam os meses mais secos, quando as perdas são mais intensas nos horizontes mais superficiais.

No mês de janeiro, as precipitações constantes permitem que o perfil seja alimentado com a água de precipitação, ocorrendo, muitas vezes, umidades mais elevadas na superfície do terreno. Em perfis bem drenados, a rápida descarga da água infiltrada contribui para a tendência de ocorrerem perfis de umidade com valores mais homogêneos. Ao contrário, em agosto-setembro, a escassez de chuva associada à baixa umidade atmosférica exerce influência nos horizontes superficiais, fazendo com que tais horizontes apresentem valores de umidades mais baixos. Nesses meses, os horizontes mais profundos recebem influência mais direta do nível freático, contribuindo para uma diminuição menos significativa dos valores de umidade, do que as verificadas nos horizontes mais superficiais.

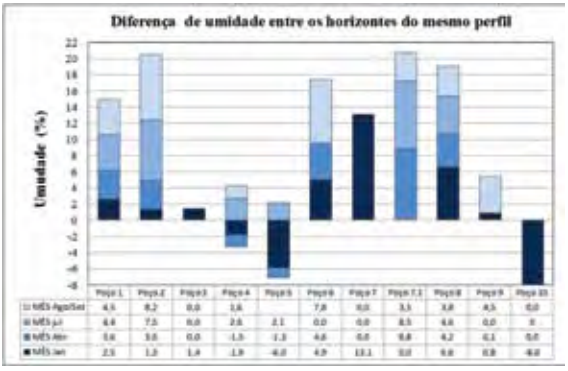


Figura 6. Diferença sazonal de umidade (w_{nat}) entre os horizontes a 1 m e 3 m de um mesmo perfil: poços situados nas regiões norte e sul de Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

A Figura 7 apresenta as variações de umidade entre os perfis estudados nas profundidades de 0,1 e 0,5 m, especificamente para agosto-setembro de 2010. Para os perfis representativos dos Poços 1, 3, 6 e 7.1, foram observados os menores valores de umidade em 0,1 m, entre 3 e 10%. As maiores diferenças de umidade entre 0,1 e 0,5 m de profundidade foram observadas para os perfis dos Poços 1, 6 e 7.1, e as menores diferenças foram encontradas para os Poços 2 e 5. A variação negativa de umidade observada no perfil do Poço 9 pode estar associada à influência do sistema de rega artificial, observado no local, justificando a diferença de umidade encontrada.

Figura 7. Diferença de umidade (w_{nat}) no perfil entre as profundidades 0,10 e 0,50 m em agosto-setembro de 2010: poços estudados nas regiões norte e sul de Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

Topograficamente, os locais onde os perfis encontram-se posicionados apresentam declividades suaves, no geral, inferiores a 5%, o que reduz o escoamento superficial e amplia a tendência de infiltração das águas da chuva, favorecendo, assim, o fluxo descendente que se dá, em geral, em meio não saturado mesmo durante a estação chuvosa. Alternativamente, durante o período seco, sob essas mesmas condições, o fluxo ascendente é favorecido. O ciclo de umedecimento e secagem estabelecido sazonalmente pode responder pelas variações das propriedades geotécnicas observadas até aproximadamente 2 m de profundidade.

3.5 Curva característica e variação sazonal do processo de infiltração nos perfis de solos estudados

a) Curva característica

Análises das curvas características (Figura 8 a, b, c) indicam que, para pequenas variações de umidade, ocorrem tanto grandes quanto pequenas variações de sucção. No domínio dos macroporos, as variações de umidades superiores a 25%, afetam pouco a sucção. As variações de umidade entre 15% e 25% compreendem o trecho entre domínio dos macroporos e microporos. Nesse intervalo, pequenas variações de umidade correspondem a grandes variações na sucção.

O comportamento da variação de umidade ao longo do ano indica que, no período chuvoso, o gradiente de sucção não é tão elevado. Em janeiro, no geral, os perfis de solos estudados apresentaram variações de umidade entre 22 e 30%, situando-se no domínio dos macroporos, portanto, sob pequenas sucções. Ao final do período chuvoso, o gradiente de sucção varia de pequeno a bastante elevado ao longo do perfil, pois a variação de umidade no mês de abril encontra-se na transição dos domínios dos macroporos para os microporos, ou seja, a umidade varia nesse período entre 14 e 28%.

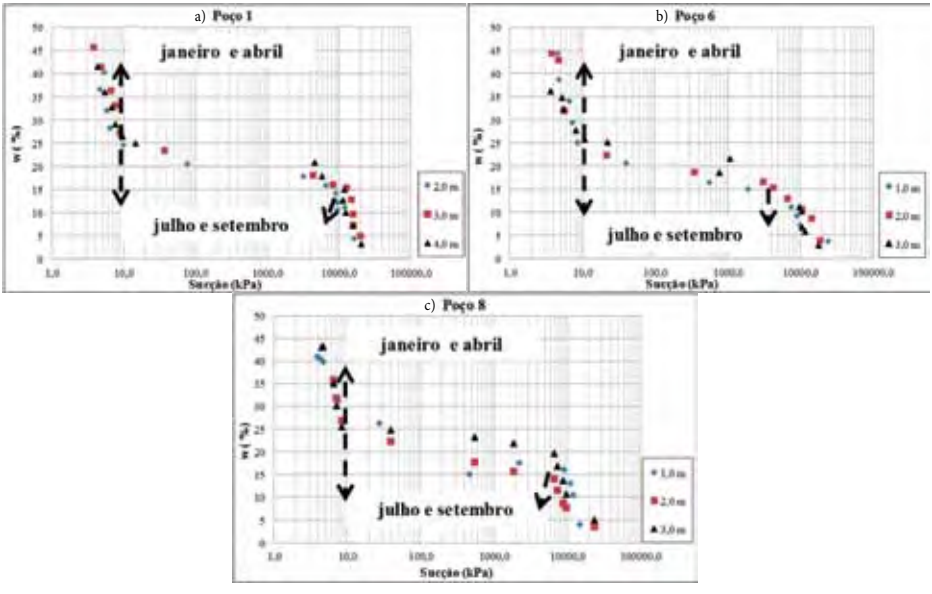


Figura 8. Curva característica: relação sucção *versus* umidade (w) dos solos dos perfis – (a) Poço 1; (b) Poço 6 e (c) Poço 8 – situados nas regiões norte e sul de Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

Ao considerar agosto-setembro de 2010, a variação de umidade ao longo do perfil entre 3 e 25%, o comportamento observado nas curvas características indica gradientes de sucção elevados. Nessa situação, o perfil do Poço 8 encontra-se praticamente no domínio dos microporos, pois o teor de umidade é inferior a 15% para todas as profundidades. Ao contrário, os poços 1 e 6 não estão restritos apenas ao domínios dos microporos, pois em algumas profundidades situam-se na transição dos domínios.

Vale ressaltar que as variações de sucção entre os limites da macro e microporosidade são as que mais intervêm nos processos de infiltração. Dessa forma, considerando que a variação de umidade ao longo do perfil dos poços estudados encontra-se no final da estação chuvosa (abril) na faixa de transição dos domínios, é possível inferir que, nesse período, ocorre maior variação de sucção ao longo do perfil, com possível influência no processo de infiltração. Cabe lembrar que sucções elevadas, apesar de favorecerem a ampliação da taxa de infiltração na fase inicial, podem em seguida, colocar a fase ar contínua sob pressão positiva e ter esta mesma infiltração bloqueada.

b) Variação sazonal da taxa de infiltração

A avaliação da taxa de infiltração superficial do terreno, utilizando anéis de cilindros concêntricos, foi realizada nas profundidades de 0,1, 0,2 e 0,3 m, durante a campanha de campo realizada em agosto-setembro de 2010. A capacidade de infiltração indicada para os pontos estudados apontou para a tendência de aumento com a profundidade (Tabela 11).

Para a profundidade de 0,1 m, os locais que apresentaram valores acima de 30 mm/h são considerados como de alta capacidade de infiltração, e aqueles inferiores a 5 mm/h indicam capacidade muito baixas, segundo Reichardt (1990). Os valores apresentados para as áreas indicadas com alta capacidade de infiltração podem ser atribuídos tanto ao método utilizado, em que a coluna de água tende a ampliar a infiltração**,** quanto ao histórico de uso e ocupação da área marcada por baixa antropização.

Tabela 11. Capacidade de infiltração (mm/h) obtida pelo Infiltrômetro de cilindros concêntricos em agosto-setembro de 2010: regiões norte e sul de Goiânia/GO (LUIZ, 2012).

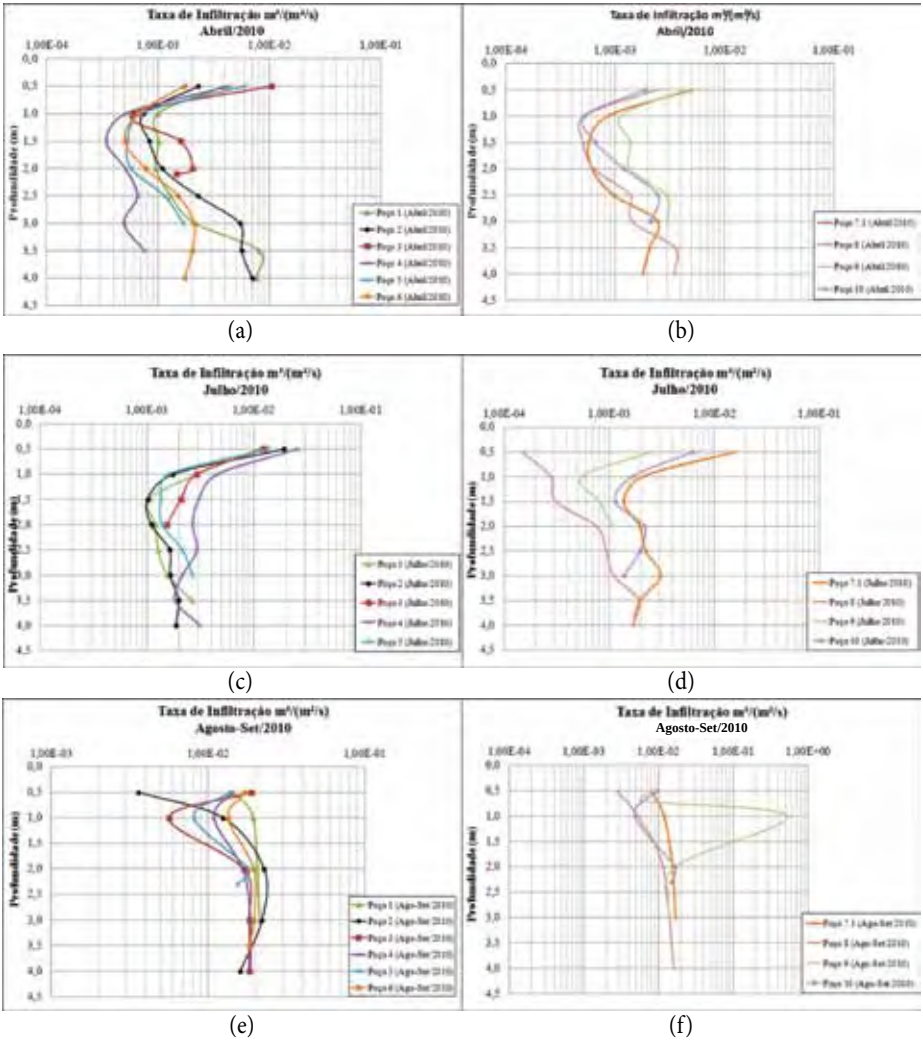
Região norte						
Prof. (m)	**Poço 1**	**Poço 2**	**Poço 3**	**Poço 4**	**Poço 5**	**Poço 6**
0,1	67	195	86	373	60	66
0,2	161	195	180	175	70	30
0,3	239	215	155	398	129	53
Região sul						
Prof. (m)	**Poço 7.1**	**Poço 8**		**Poço 9**		**Poço 10**
0,1	106	0,5		43		10
0,2	120	154		116		30
0,3	227	121		128		30

Especificamente o Poço 2 encontra-se inserido em área com presença expressiva de microfauna (cupins e formigas), do que é possível inferir a possibilidade de tubificações intervirem no processo de infiltração. Quanto ao poço 4, a alta capacidade de infiltração apresentada pode ser justificada pelo fato de que a área não apresenta histórico de ocupação intensiva; atualmente, encontra-se em processo de regeneração da cobertura vegetal.

Em relação ao Poço 8, a baixa capacidade de infiltração indicada na camada de 0,1 m de profundidade aponta para o selamento dessa camada. O referido poço encontra-se em área com histórico de trânsito de máquinas para a retirada da cobertura natural e para estacionamento de ônibus escolar. Especificamente em relação aos resultados apresentados para o local onde se insere o Poço 10, observa-se que em todas as profundidades os valores são

inferiores a 30 mm/h. O referido poço encontra-se inserido em área em que a cobertura do solo é pastagem.

Os ensaios de infiltração realizados por meio do rebaixamento do nível d'água em poço foram realizados acompanhando a sazonalidade da umidade no campo, nos meses de abril, julho e agosto-setembro, em profundidades que variaram entre 0,5 e 4 m. A Figura 9 a, b, c, d, e, f apresenta os resultados dos ensaios realizados em 2010 nos meses de abril, julho e agosto-setembro, considerando as regiões norte e sul de Goiânia. Cabe destacar que, para os meses de abril e julho, os ensaios foram realizados ao longo da profundidade em um único furo, sendo, porém, utilizado um furo para cada mês, pois, após realizado o ensaio em uma camada mais superficial, aprofundava-se o furo e realizava-se o ensaio para a profundidade seguinte. Para o mês de agosto-setembro, optou-se por realizar os ensaios em furos independentes para cada profundidade.



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Figura 9. Variação sazonal da taxa de infiltração: regiões norte e sul de Goiânia/GO. (LUIZ, 2012).

Considerando as regiões norte e sul, as taxas de infiltração ao longo dos perfis apresentaram variações mais expressivas entre os perfis e em profundidade durante os testes executados, principalmente nos meses de abril e julho. Em agosto-setembro, essas variações apresentaram diferenças menores. Em ambas as regiões, os menores valores obtidos para as taxas de infiltração a 0,5 m de profundidade apontam para a ação de adensamentos por processos de contração oriundos da interação solo-atmosfera e compactações de origens diversas das camadas mais superficiais do perfil, tais como passagem de veículos e pisoteio de animais.

Verifica-se, ainda, para ambas as regiões, que entre 1 m e 2 m de profundidade as taxas de infiltração, independentemente da época do ano em que foram realizados os ensaios, tenderam a se estabilizar, invertendo-se a partir daí a tendência de variação da taxa de infiltração até 3 m de profundidade, quando aparentemente tende a estabilizar-se. Portanto, depreende-se desses resultados que, até 1 m de profundidade, as influências externas oriundas do antropismo da própria interação solo-atmosfera no que tange à sazonalidade se fazem presentes de modo mais marcante; a partir de 2 m, à medida que se aprofunda no perfil, a taxa de infiltração passa aparentemente a ser mais influenciada por aspectos internos como o nível de intemperização do maciço. A influência geológica, conforme já observado por Cardoso (1995), ao estudar a colapsibilidade de solos do Distrito Federal, é praticamente imperceptível no manto superficial de solo profundamente intemperizado, não marcando, assim, diferenças de comportamento entre as duas regiões. Com isso, é possível concluir que a zona ativa do perfil restringe-se aos três primeiros metros, independentemente da região e formação geológica de base.

Destaca-se, finalmente, que as variações das taxas de infiltração ao longo dos perfis e entre diferentes épocas do ano refletem a influência da sazonalidade na variação da umidade e da sucção na zona ativa do perfil. É evidente que as variações de umidade e sucção e, portanto, da capacidade de infiltração do solo depende de fatores como cobertura do solo, morfologia do terreno e tipo de solo.

4 Considerações finais

Os perfis estudados situam-se em áreas de baixas declividades, inferiores a 8%, o que reflete uma tendência preferencial à infiltração, principalmente o Poço 7.1, que se situa nas Superfícies Aplainadas dos Chapadões de Goiânia, conforme Casseti (1992). Por outro lado, características geotécnicas dos perfis quanto ao teor de agregação, entre 37 e 74%, índice de vazios entre 0,9 e 2,7 e grau de saturação, nos períodos úmidos (janeiro e abril), entre 40 e 60% e, nos períodos mais secos (julho, agosto e setembro), entre 9 e 15%, podem justificar o comportamento da infiltração para os respectivos perfis, quando se observam as elevadas taxas de infiltração.

A variação sazonal da saturação do solo associada ao elevado índice de vazios dos perfis de solos estudados permite afirmar que, após períodos de estiagem prolongados, a presença de fase ar contínua pode, quando ocorre a infiltração em consequência de precipitações, provocar o surgimento de poropressões positivas na fase ar, em consequência da frente de saturação, impedindo, assim, a sua continuidade. Essas condições fazem com que o processo de infiltração, nos meses secos, mesmo com ocorrência de eventos pluviométricos de intensida-

de elevada, mas condicionados a curtos espaços de tempo, seja menos expressivo, provocando aumento do escoamento superficial.

O estudo mostrou que, para as áreas estudadas, a influência da sazonalidade na taxa de infiltração se dá principalmente no primeiro metro de perfil de intemperismo. Mostrou ainda não ser possível colocar em evidência a influência da origem do solo quanto a geologia nos mantos de intemperismos estudados, sobressaindo-se, assim, a mesma constatação feita por Cardoso (1995) ao estudar a colapsibilidade de solos profundamente intemperizados do Distrito Federal.

Referências bibliográficas

ARMANI, G. (2009). Análise topo e microclimática tridimensional em uma microbacia hidrográfica de clima tropical úmido de altitude. São Paulo: USP. 149 p. Tese (Doutorado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

AYOADE, J. O. (1991). Introdução à climatologia para os trópicos. 3. ed., Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil. 332 p.

AZEVEDO, P. V.; RAMOS LEITÃO, M. M. V. B; SOUSA, I. F.; MACIEL, G. F. (1990). Balanço de radiação sobre culturas irrigadas no semi-árido do nordeste do Brasil. Revista de Meteorologia, v.5, n. 1, p. 403-410.

BRANDÃO, A. M. P. M. (1996). O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro. São Paulo: USP. 364 fls. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D., FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO APOLINÁRIO, R. (2006). Processos erosivos. *In:* CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Orgs). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília, DF: Universidade de Brasília, FINATEC. p. 40-91.

CAMPOS, J. E. G.; RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L.; MAGALHÃES, L. F., MARANHÃO SÁ, M. A. (2003). Diagnóstico hidrogeológico da região de Goiânia. AGIM/GO. Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria da Indústria e Comércio. Goiânia, GO: Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás. 125 p.

CARDOSO, F. B. F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso. Brasília, DF: UnB. 140 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM-026A/95.

CARDOSO, F. B. F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Brasília, DF: Unb. 357 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.TD - 001A/09.

CASSETI, V. (1992). Geomorfologia do município de Goiânia-GO. Boletim Goiano de Geografia, v. 12, n 1, p. 65-85.

FEURHARMEL, C; Pereira, A.; BICA, A. V. D.; GEHLING, W. Y. Y.; VIVIAN, J. B. (2007). Desenvolvimento de um permeâmetro flexível de parede flexível para determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6, 01 nov. 2007, Salvador, BA. Anais… Salvador: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 459-466. CD ROM.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. New York, USA: J. Wiley. 517 p.

GEIGER, R. (1990). Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo. 2. ed., Lisboa: Fundação Calouste Glbenkian. 556 p.

GITIRANA JR, G. F. N. (2005). Weather-realated geo-hazard assessment model for railway embankment stability. PhD Thesis. Department and Geological Engineering. University of Saskatchewan. Sasktoon, Saskatchewan, Canadá. 411 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1999). Saneamento básico e problemas ambientais em Goiânia–1992. Divisão de Geociências do Centro Oeste. Rio de Janeiro: IBGE. 80 p.

IMAMURA-BORNSTEIN, I. R. (1991). Observation studies of urban heat island characteristics in different climate zones. University of Tsukuba. PhD Thesis. Institute of Geoscience of University of Tsukuba, Japan. 156 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (1999). Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Manual de Observações Meteorológicas. 3. ed., Brasília: INMET. p. 36-62.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília, DF: UnB. 336 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.TD - 017A/03,

LUIZ, G. C. (2012). Influência na relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso-Município de Goiânia/GO. Brasília, DF: UnB. 271 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

MENDONÇA, F. A. (1995). O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR. São Paulo, SP: USP. 300 fls. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. (2007). Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos. 206 p.

MENDONÇA, F. A. (2009). Urban heat and urban cool island: influences of vegetation and soil surface in cities. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 7, 29 jun. 2009, Yokohama, Japan. Proceedings... Yokohama: ICUC. p. 65-89.

MOLION, L. C. (2006). Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do Pacífico Sul. Revista Climanálise, v.3, n.1 p.1-9.

MOTA. F. S.; FERREIRA, M. D.; PEJON, O. J. (2007). Análise das relações entre absorção de água e condutividade hidráulica dos solos em estudos de erosão. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6, 01 nov. 2007, Salvador, BA. Anais... Salvador: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 667-473. CD ROM.

NIMER, E.; BRANDÃO, A. M. (1989). Balanço hídrico e clima da região dos cerrados. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/IBGE. 166 p.

NOGUEIRA, J. F. (2005). Análise da influência do fluxo por capilaridade na degradação físico-química do solo. Brasília, DF: UnB. 108 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF. Publicação G.DM. 137/05.

REICHARDT, K. (1990). A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole. 171 p.

SANT'ANNA NETO, J. L. (1998). Clima e organização do espaço. Boletim de Geografia, Maringá, v. 1, n.16, p. 119-131.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. (2004). Infiltração e armazenamento no solo. TUCCI, C. E. M (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.

SORRE, M. (1951). Les fondements de la géographie humaine. Primeiro tomo: Les fondements biologiques (Essai d'une écologie de l'homme). 3. ed., Paris: Armand Colin. 32 p.

Capítulo 4
A interação entre a geomorfologia e os processos de infiltração

Andrelisa Santos de Jesus
Claudia Valéria de Lima
José Camapum de Carvalho

1 Introdução

A infiltração é um processo hidrológico intimamente relacionado aos aspectos climatológicos, hidrogeológicos, pedológicos, geotécnicos, de cobertura e geomorfológicos da paisagem. Logo, as questões relacionadas à infiltração são transdisciplinares e, se trabalhadas adequadamente, podem revelar soluções para problemas ambientais relacionados a circulação da água na superfície terrestre ou no interior dos maciços. Neste capítulo, serão enfatizadas as relações e influências mútuas entre os processos de infiltração e a geomorfologia, que é a ciência que se dedica ao estudo das formas do relevo.

Inicialmente, serão abordados os conceitos relacionados a geomorfologia, relevo, processos geomorfológicos; em seguida, as teorias sobre a gênese das formas de relevo e a bacia hidrográfica como unidade de estudo geomorfológico; por fim, a influência direta das formas de relevo no processo de infiltração com ênfase nas vertentes e nas alterações, especialmente hidrológicas, resultantes da ocupação dessas formas.

2 A gemorfologia

A geomorfologia é, etimologicamente, a ciência que estuda as formas da superfície terrestre. Para Hubp (1989) aciência geológico-geográfica que estuda o relevo terrestre". O relevo é o conjunto de reentrâncias e saliências que determinam a forma da superfície terrestre. Numa definição mais complexa Moreira e Pires Neto (1998) apontam que o relevo é produto da interação entre litosfera, atmosfera e hidrosfera, em cuja interface se processa a troca de energia e matéria ao longo do tempo e do espaço. As trocas de energia se dão processando o equilíbrio na dinâmica natural transformadora do relevo. Parece paradoxal falar de equilíbrio na dinâmica, mas esta é a cadência: altera-se um pouco, restabelece-se o equilíbrio e assim sucessivamente, com alterações geralmente imperceptíveis do relevo na escala de tempo da vida humana. Porém, se a alteração desse equilíbrio de energia foge ao fluxo natural por intervenção antrópica ou de eventos naturais extremos as alterações geomorfológicas saltam aos olhos humanos e apresentam, geralmente, graves consequências para os ocupantes do espaço geomorfológico atingido.

O relevo pode então, ser formado por vários processos, os quais são entendidos por Christofoletti (1982, p.1) como "uma sequência de ações regulares e contínuas que se desenvolveram de maneira relativamente bem especificada e levando a um resultado determinado". A complexidade dos processos geomorfológicos envolve uma inter-relação entre vários agentes e a intensidade de sua ação no tempo e no espaço (Infanti Junior e Fornasari Filho, 1998).

Assim, os processos que atuam na formação do relevo podem ser endógenos, ou seja, induzidos por forças geotermais ou tectônicas. O relevo também é formado por processos exógenos, isto é, aqueles que ocorrem na superfície terrestre impulsionados por forças climáticas e gravitacionais onde a degradação é o principal processo, o qual está relacionado a vários agentes, tais como clima, vegetação, solo, hidrografia e homem. Os processos endógenos e exógenos atuando de forma variada no tempo e no espaço dão origem a formas diversas. Numa escala planetária, destacam-se os oceanos e continentes; já numa escala continental, é possível citar desde montanhas, colinas, vales, até as pequenas formas de tamanho milimétrico como as depressões originadas pelo impacto das gotas de chuvas. É importante salientar que de acordo com Guerra (2003) os processos que determinam as formas do relevo atuam num longo período de tempo, o tempo geológico, embora existam formas que são criadas, transformadas e que até desaparecem em curtíssimos períodos de tempo, como os vulcões e voçorocas. As formas já produzidas passam a determinar processos que as alterarão, algumas vezes num curto período de tempo, o tempo histórico da atuação humana, e em outras no tempo geológico.

De acordo com Jesus et al. (2009), uma vez constituídas, essas formas passam a influenciar novos processos. Utilizando-se como exemplo a vertente, verifica-se que sua forma – côncava, convexa ou retilínea – induzirá ao desenvolvimento de processos de fluxo d'água diferenciados, os quais, por sua vez, influirão na gênese de novas formas como, por exemplo, vertentes reesculpidas, vales fluviais, sulcos, entre outros. Essas formas sequenciarão a relação cíclica de uma forma que gera processo, o qual gera nova forma e, assim, por diante (Figura 1). Segundo Camapum de Carvalho et al. (2006), quando as forças excedem a resistência dos sistemas naturais, ocorrem modificações no terreno, que podem ou não serem perceptíveis, dependendo da velocidade do processo ou da relação das forças atuantes.

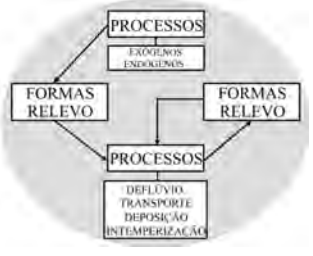


Figura 1. Relação processo X forma (JESUS *et al.*, 2009).

No contexto dos processos exógenos, Coelho Netto (1995, p. 93) destaca a "água como um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre, interligando fenômenos da atmosfera inferior e da litosfera", tendo como uma das suas principais funções a modelagem do relevo por processos hidromecânicos e químicos que atuam conjuntamente também na formação do solo.

3 A gênese do relevo e a dinâmica da infiltração

Ao longo do tempo geológico, os processos exógenos atuando junto com os processos endógenos de soerguimento determinaram as diversas formas de relevo existentes na superfície terrestre. Várias teorias explicam essas relações processuais da morfogênese, destacando-se a peneplanação, a pediplanação e a etchplanação.

A teoria precursora na explicação do relevo terrestre é a peneplanação desenvolvida por W.M Davis (1889). Esse autor, fundamentando-se no conceito de nível de base de Powell (1875), segundo o qual os rios não podem erodir abaixo do seu nível de base, sugere que a interação entre a capacidade de entalhamento dos vales e o soerguimento da massa continental gerariam três fases no relevo: juvenil, madura e senil. A fase juvenil é caracterizada pela formação de diversos canyons resultantes do forte entalhamento dos talvegues em função do elevado gradiente produzido pelo soerguimento (Casseti, 1994). Um posterior "equilíbrio" entre a erosão e a deposição marca o fim da juventude e o começo da maturidade (Figura 2). A morfologia resultante desse ciclo seria representada por extensas áreas planas denominadas peneplanos. Ao atingir o estágio de senilidade, o relevo poderia ser submetido a novo soerguimento, iniciando novamente o ciclo do relevo "juvenil-maduro-senil", sendo essa nova fase denominada de rejuvenescimento.

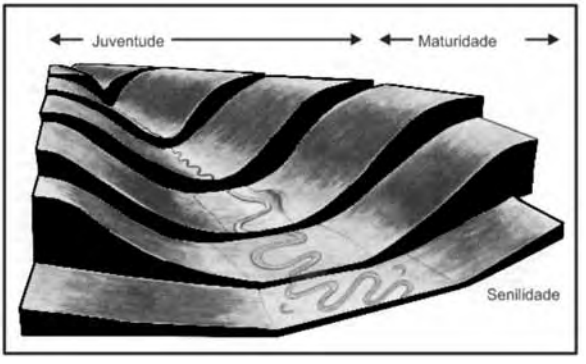


Figura 2. Ciclo do relevo segundo Davis (RICE, 1982 *apud* CASSETI, 2005).

A teoria da pediplanação parte do princípio de que a evolução das vertentes se dá por retração paralela, por intemperismo e gravidade, incisão fluvial e por tectônica. Em condições de clima úmido, prevalecem a ação do intemperismo e *creep (*KING, 1953). Com respeito à evolução das vertentes, Jahn (1954 *apud* CASSETI, 1991) distingue os componentes perpendicular e paralelo. O componente perpendicular está relacionado à infiltração que determina a intemperização e formação de solos. O componente paralelo refere-se ao escoamento que permite a atuação dos processos degradacionais no transporte do material elaborado pelo componente perpendicular. A atuação desses "componentes" foi denominada por Tricart (1957) como "balanço morfogenético".

Conforme apresentado por Penck (1924), a vertente evolui por recuo paralelo ocasionado pela incisão vertical, que é o processo de "entalhamento dos vales" (dissecação) e pela denudação (ou rebaixamento), que envolve os processos de erosão sobre as vertentes. Existem ainda as influências tectônicas que contribuem para o soerguimento (Figura 3).

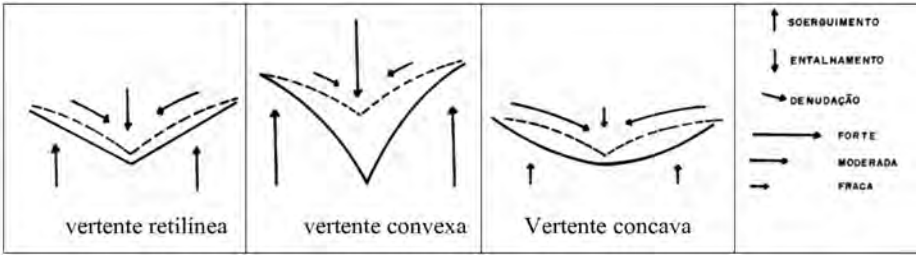


Figura 3. Evolução das vertentes segundo Penck (PENCK, 1924 *apud* CASSETI, 2005).

Desse modo, um soerguimento pronunciado resulta em uma incisão vertical forte e denudação fraca, dando origem a vertentes convexas (Figura 3). Quando o soerguimento for fraco, a incisão vertical também será fraca e a denudação intensa, resultando em vertentes côncavas. No caso de o soerguimento ter uma magnitude tal que resulte em equilíbrio entre a incisão vertical e a denudação, resultará em vertentes retilíneas (Figura 3).

Buscando uma explicação geoquímica para evolução do relevo, surgiu a teoria da Etchplanação, originalmente proposta por Wayland, em 1933, e posteriormente trabalhada por outros autores. De acordo com Vitte (2001), Wayland foi o primeiro a aplicar esse conceito; todavia, foram Branner, em 1886, e Falconer, em 1911, que fizeram as primeiras observações quanto à importância do intemperismo químico para formação das paisagens. Somente em 1936 o conceito de etchplanação é desenvolvido por Willis, e a partir de 1957, com os trabalhos de Büdel, a teoria da etchplanação ganha ampla divulgação.

A teoria da etchplanaçao parte do pressuposto de que a esculturação do relevo é fortemente influenciada por processos geoquímicos, ressaltando, assim, o papel do intemperismo no processo morfodinâmico das paisagens (VITTE, 2005). Segundo esse autor, a bacia hidrográfica funcionaria como unidade escalar básica para a operacionalização da referida teoria, uma vez que a geomorfologia do canal e a dinâmica do sistema fluvial, como um todo, participam ativamente do processo de aplainamento geoquímico do relevo, condicionando a velocidade do fluxo da água e o tempo de permanência da água no sistema.

Os diversos trabalhos sobre a geomorfologia do cerrado, de modo geral, têm buscado, pelo menos até então, explicação para a gênese do relevo nas teorias de pediplanação de Lester King. No entanto, tem crescido o número de trabalhos que buscam subsídios na teoria de etchplanação, destacando-se os estudos de Novaes Pinto (1993), que, sem abandonar a teoria da pediplanação, passa a utilizar a teoria de etchplanação para explicar a gênese das chapadas. Segundo os estudos que realizou no Distrito Federal, as primeiras chapadas foram modeladas por processos de etchplanação durante o Terciário, enquanto as demais foram formadas por processos de pediplanação e pedimentação iniciados no Plioceno e interrompidos durante o Quaternário, período em que ocorreram processos de dissecação fluvial.

4 Bacia hidrográfica: unidade de análise geomorfológica

Independentemente da teoria que explica a gênese evolutiva do relevo, sua classificação e cartografia podem ser feitas de acordo com várias taxonomias. Não existe um consenso

internacional sobre isso. Mas, seja qual for o tipo de classificação e a taxonomia adotada, normalmente a abordagem dessas formas e processos em geomorfologia é feita utilizando-se do recorte espacial das bacias hidrográficas, pois muitos pesquisadores consideram a bacia como uma unidade natural de análise da superfície terrestre onde é possível reconhecer a inter-relação dos diversos elementos do meio físico e deste com os meios biológico e socio-econômico, em escalas definidas.

Coelho Netto (1995) define a bacia de drenagem como sendo uma área que drena os fluxos líquidos, sólidos e solúveis para uma única saída denominada exutório. As bacias hidrográficas são conceituadas como um conjunto de terras drenado por uma rede de drenagem e delimitado por um divisor de águas, isto é, o ponto mais elevado do terreno (CHRISTOFOLETTI, 1982; JORGE e UEHARA, 1998; BOTELHO, 1999 GUERRA e GUERRA, 2001). A bacia de drenagem enquanto unidade singular pode ser subdividida em subunidades, marcadas por suas respectivas posições, incluindo: topo, unidade superior de recarga e divergência de fluxos d'água, cuja linha divisória da trajetória oposta desses fluxos é conhecida como divisor de águas; vertente, unidade lateral de transferência de fluxos d'água e canais que correspondem a zona de convergência e drenagem dos fluxos d'água de forma perene ou intermitente.

Christofoletti (1979) considera a bacia hidrográfica como um sistema aberto com entrada e saída de energia e matéria, onde todos os elementos que a compõem se inter-relacionam. Essa inter-relação é denominada por Rezende *et al.* (1995) como tetraedral: clima-solos--organismos-socio-economia. Desse modo, Cunha e Guerra (1996) afirmam que qualquer alteração em um desses elementos atingirá os demais, alterando os fluxos de energia e matéria**.** Exemplo desses fluxos são os processos de infiltração e percolação que, segundo Soares *et al.* (2007), são responsáveis pela manutenção da bacia hidrográfica como um reservatório dinâmico do sistema hidrológico o qual permite a armazenagem e transferência de água. Mas, segundo esses autores, para se ter uma compreensão sistêmica dos processos de infiltração, é necessário considerar as conexões existentes entre a água, os elementos do meio físico e a dinâmica do uso da terra. Nessas conexões, é fundamental a atmosfera, pois a infiltração é fortemente dependente da interação solo atmosfera, conforme apontado por Luiz (2012). A temperatura e umidade relativa do ar acabam por afetar a sucção atuante no solo, e esta exerce forte influência sobre a infiltração, conforme mostrado por Silva (2012).

Logo, conforme afirma Botelho (1999), a bacia hidrográfica passou a ser utilizada não só como unidade básica de análise geomorfológica, mas também de estudos de planejamento ambiental. Desse modo, a lei 9.433 de 08/01/97 (Brasil, 1997) estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial que possibilita a atuação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH).

5 Interações mútuas entre as formas de relevo e os processos

Faz-se necessário contextualizar o título desta seção, pois, ao se abordarem a forma de relevo e os processos de infiltração, o foco é o relevo em seu estado natural ou antrópico visto sob um olhar estático, ou seja, o relevo é como está e a infiltração ocorrerá em função de sua forma. Por outro lado, ao se abordarem os processos de infiltração e as formas do relevo, o

olhar se volta para a dinâmica do relevo imposta pela infiltração, sendo essas afetadas ou não por intervenções antrópicas. A infiltração e o fluxo assumem, nesse caso, papel não de modelagem paulatina do relevo, mas sim de elemento desencadeador da sua nova configuração pela ruptura do equilíbrio entre a energia gravitacional ou translacional externa e a energia interna de sustentação. Essa energia é ligada às forças eletromagnéticas de origem químico-mineralógica e à presença de cimentos estabelecidos ao longo da história do maciço. No contexto atual, dada a rapidez com que pode se processar a transformação do relevo por meio da atuação da infiltração e do fluxo e devido às suas consequências socioambientais que assumem, muitas vezes, proporções catastróficas, a segunda parte do título desta seção passa a ter grande importância.

A dinâmica evolutiva das formas de relevo, com ênfase nas vertentes, está, no que tange aos processos exógenos, diretamente ligada à capacidade de infiltração da água. A infiltração possui implicações nos fluxos superficiais e na circulação interna da água conforme as características de permeabilidade de cada solo que compõe a paisagem geodinâmica onde está a vertente. Além disso, a depender das propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo e/ou das características do fluido de infiltração, o maciço poderá ser paulatinamente degradado até a sua ruptura devido ao desequilíbrio de energia gerado entre as forças resistentes e as translacionais ou gravitacionais mobilizadoras. Cabe aqui destacar que, enquanto a energia translacional, que também é de fundo gravitacional, geralmente atua configurando novas formas de vertente, as simplesmente gravitacionais são responsáveis por subsidências mais ou menos importantes em função das alterações que impõem ao relevo.

Para compreender essa dinâmica, é importante distinguir os conceitos de infiltração e permeabilidade, os quais são distintos e complementares. A infiltração é um processo pelo qual a água que está entre a superfície e a atmosfera passa para a pedosfera, ou seja, penetra no solo. Diversas condições ambientais influenciam a infiltração, dentre os quais se destacam o equilíbrio de energia entre o solo e a atmosfera, que oferecerá maior ou menor demanda de água em um desses meios. Esse equilíbrio pode ser verificado na incidência dos raios solares, na temperatura, nos índices de precipitação e na forma de sua distribuição, na direção dos ventos, na umidade relativa do ar e nas taxas de evapotranspiração que refletem diretamente o equilíbrio solo-atmosfera. Em estudo recente, Luiz (2012) mostra a importância da interação solo-atmosfera para o processo de infiltração na cidade de Goiânia, no estado de Goiás, realçando a relevância da ação antrópica no processo interativo.

Já a permeabilidade diz respeito a uma propriedade hidromecânica do solo que determinará as condições de percolação da água no solo, isto é, de circulação da água no solo. Destaca-se que todas as propriedades físicas do solo, tais como índices de vazios, porosidade, distribuição dos poros, arranjo das partículas e de seus grupamentos, umidade natural, saturação, peso específico e textura, assim como as químico-mineralógicas influenciarão a permeabilidade no âmbito do aspecto geral do maciço. Há que se observarem, ainda, aspectos específicos que podem mudar a permeabilidade do solo e intervir diretamente na capacidade de infiltração da água no maciço. Os mais relevantes encontram lastro na geologia estrutural e nas bioturbações oriundas de ações da vegetação, de térmitas e de outros animais e microorganismos.

Salienta-se que todas as propriedades do solo e deste com os demais elementos do meio físico, como clima, rocha, relevo e vegetação, dão-se por uma relação constante de equilíbrio

que é variável no tempo. O relevo, em termos geológicos "está intimamente ligado ao fator tempo na gênese dos solos; é, portanto, de se esperar que, na paisagem brasileira, onde os processos de pedogênese são bastante ativos ele tenha um papel crítico como controlador do tempo de exposição aos agentes bioclimáticos" (REZENDE *et al.*, 1995, p. 133). Logo, enfatizando o relevo como elemento importante no processo de infiltração, inevitavelmente se está tratando desses elementos e de suas relações, pois sua interação é intrínseca. Por exemplo, falar que um topo plano influencia a infiltração ou que um topo convexo, uma escarpa ou mesmo uma vertente convexa influencia o escoamento superficial é fazer referência ao respectivo tipo de solo que recobre essas formas. Nos topos planos, a característica topográfica favorece a infiltração; por conseguinte, a água que circula no maciço favorecerá o processamento de reações químicas que resultam no intemperismo e na formação de mantos espessos de solo, uma vez que, nessa condição, a alteração intempérica é forte e o transporte mecânico de partículas na superfície menos importante. Nessas condições, o fluxo vertical favorecido impõe solubilizações e lixiviações mais significativas no plano horizontal. Esse plano submete-se de modo mais significativo ao fluxo, propiciando o surgimento de condições anisotrópicas de fluxo e de comportamento mecânico do maciço, e evolui ao longo do tempo até que os elementos estruturais de sustentação se rompam por diferentes motivos gerando subsidências (Figura 4).

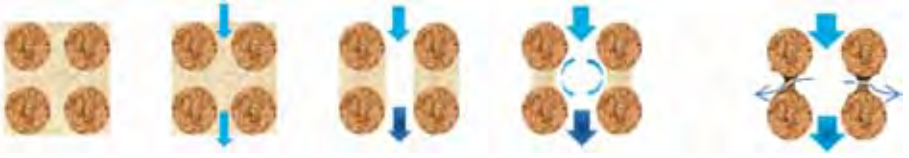


Figura 4. Mecanismo de degradação do maciço interpartículas ou interagregados devido a fluxo predominantemente vertical.

Por outro lado, os relevos mais declivosos, até por uma questão de gravidade, dificultam a infiltração. Logo, a pouca presença de água circulando no maciço não favorece o intemperismo, os solos que se formam são mais rasos, e o transporte mecânico de partículas pelo fluxo superficial se torna mais acentuado (Figura 5). Isso não significa que o pouco que infiltra ou o que provém por fluxo interno do topo do maciço não seja desencadeador de instabilizações modeladoras do relevo. A zona de interface entre o material intemperizado e não intemperizado constitui-se, geralmente, pela baixa permeabilidade deste último, em região de acumulação de água, comprometendo as tensões efetivas atuantes e, portanto, a resistência ao cisalhamento do solo.

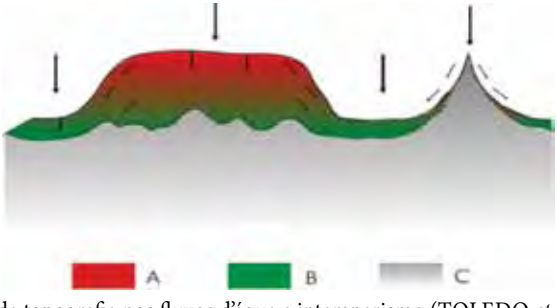


Figura 5. Influência da topografia nos fluxos d'água e intemperismo (TOLEDO *et al.*, 2000).

5.1 Vertentes

As vertentes são, segundo Moreira e Pires Neto (1998), superfícies inclinadas que conectam a linha divisora de águas e o fundo de vale. Essa definição é considerada por Casseti (1991) como vertente *lato sensu*. A vertente *stricto sensu* é entendida por esse autor como a extensão que vai da linha divisora de águas até o local onde têm início os processos fluviais. O termo vertente é comumente utilizado na geomorfologia, mas não raramente é possível verificar o uso do termo encosta para fazer referência a vertente. De acordo com o IPT (1991), os termos tanto vertente como encosta são muito utilizados para caracterizações regionais; quando as descrições são locais, com finalidades práticas relacionadas à engenharia civil, utiliza-se o termo talude. Em geomorfologia, o talude também é uma forma abordada em escala mais reduzida, podendo se referir à superfície inclinada na base de um morro ou a um barranco de rio, mas, ao contrário da engenharia, em geomorfologia, o termo talude, segundo Guerra e Guerra (2001), por vezes adquire sentido genético.

Sejam denominadas de vertentes ou encostas, a morfologia dessas formas pode variar em planta e em perfil. Quando analisadas em perfil, as vertentes podem ter as seguintes formas: retilínea, isto é, com ângulos de declividade aproximadamente constantes; côncava, quando o perfil apresenta curvatura negativa; ou convexa, quando a curvatura do perfil é positiva.

Uma classificação que considera não só as formas em perfil, mas também as formas em planta está representada na Figura 6, em que se distinguem: vertentes com curvas de nível côncavas e perfil côncavo (tipo I); vertentes com curvas de nível côncavas e perfil convexo (tipo II); vertentes com curvas de nível convexas e perfil convexo (tipo III), e vertentes com curvas de nível convexas e perfil côncavo (tipo IV). Essas morfologias podem determinar processos,

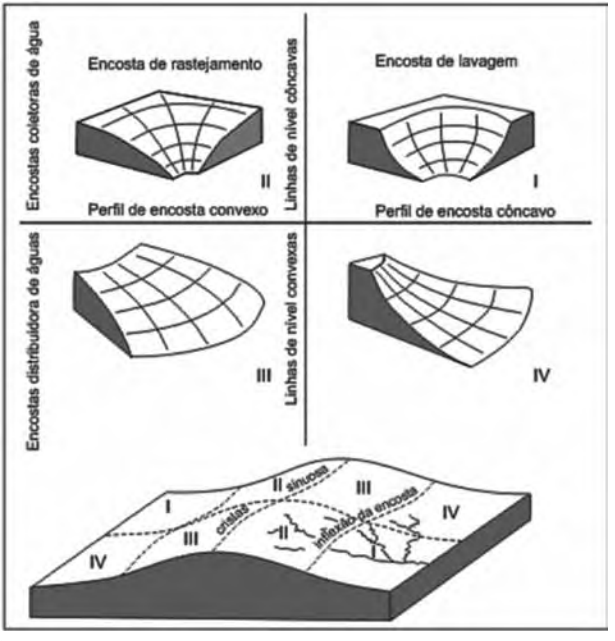


Figura 6. Classificação de vertentes segundo a forma em perfil e em mapa (TROEH, 1965 *apud* CASSETI, 2005).

como é o caso, por exemplo, das vertentes côncavas em mapa que, por terem forma "embaciada", facilitam a concentração do escoamento superficial. Isso faz com que as vertentes côncavas em mapa, tipos I e II na Figura 6, sejam particularmente suscetíveis aos processos erosivos pluviais. É evidente que, como interferem no fluxo superficial, essas formas de vertente são também definidoras da maior ou menor capacidade de infiltração da água no maciço.

Com relação à suscetibilidade das vertentes aos processos erosivos e à infiltração, devem-se considerar, além da morfologia, também fatores morfométricos, tais como o comprimento de rampa e a declividade. Quanto mais elevados a declividade e o comprimento de rampa, respeitadas as fragilidades inerentes ao meio físico de cada lugar, tais como natureza da rocha e condições climáticas, maior será o gradiente hidráulico e, consequentemente, maior a fragilidade da vertente (Figura 7) e sua propensão ao desenvolvimento de processos erosivos acelerados. Ressalta-se que as vertentes com declividades elevadas e forma côncava em planta são ainda mais suscetíveis à erosão. Já a infiltração é dificultada em declividades acentuadas. Sobre o comprimento de rampa, considerando-se unidades de área, o seu efeito isolado sobre a taxa de infiltração pode ser desprezado. Entretanto, se conjugados fatores como variações de densidade do fluido ampliado por processos erosivos e por variações térmicas do fluido devido ao contado com o solo a montante, o comprimento da vertente poderá interferir de modo significativo na infiltração.

FRAGILIDADE	DECLIVIDADE (%)
Muito Fraca	até 6%
Fraca	de 6 a12%
Média	de 12 a 20%
Forte	de 20 a30%
Muito Forte	acima de 30%

Figura 7. Fragilidade do relevo de acordo com a declividade (ROSS, 1996).

As vertentes são fundamentais no contexto da geomorfologia e da ocupação humana, pois, de acordo com Tricart (1957), essas formas constituem o elemento dominante do relevo na maior parte das regiões, apresentando-se, portanto, como a forma de relevo mais importante para o homem. É sobre as vertentes que se desenvolvem atividades tanto agropecuárias como urbanas. Essa ocupação geralmente influencia sobremaneira os principais processos que ocorrem sobre as vertentes: a infiltração, o escoamento superficial, o intemperismo, os movimentos de massa e a erosão. De acordo com Casseti (1991), a ocupação da vertente altera os processos morfodinâmicos. A retirada da cobertura vegetal expõe o solo a incidência direta dos raios solares e a efeitos pluviométricos diversos, além de facilitar o aumento da velocidade dos ventos. Isso aumenta o escoamento superficial geralmente em detrimento da infiltração. Casseti (1991) enfatiza, ainda, que a consolidação da ocupação urbana acompanhada da impermeabilização da superfície sobre as vertentes também agrava a concentração dos fluxos superficiais, comprometendo a infiltração e, consequentemente, o abastecimento do nível freático. Isso potencializa os processos erosivos, intensifica o aporte de sedimentos nos cursos d'água e favorece as vazões de pico, gerando inundações urbanas. Há que se destacar também que a exposição do solo ao vento e ao sol, além de provocar o aumento excessivo da sucção, pode gerar trincas na superfície do maciço que favorecem a infiltração. Restrepo (2010) e

Silva (2012), ao estudarem infiltração em uma camada de latossolo no Distrito Federal, mostraram que nesses solos a infiltração está bastante ligada à sucção inicial.

Verifica-se, portanto, que a ocupação humana das vertentes altera sobremaneira o ciclo hidrológico, aumentando a necessidade apontada por Coelho Netto (1995) de localização e quantificação dos fluxos d'água para entendimento dos processos geomorfológicos que comandam as alterações do relevo em variadas condições do meio físico. A alteração dos fluxos d'água por ocupação humana com consequente desencadeamento de movimentos de massa resultando em verdadeiros desastres com perdas socioeconômicas e de vida é muito bem ilustrada na região dos "mares de morros", onde prevalece a floresta tropical atlântica. Os solos rasos associados a altas declividades favorecem, em condições de grande oferta hídrica, marcada pelo verão chuvoso com altas taxas de precipitação, condições ideais para a rápida saturação do maciço. Essa saturação em solos profundamente intemperizados, ao atingir a região de macroporos, compromete a resistência do solo devido aos efeitos da sucção. Tal situação se agrava com a remoção da vegetação natural que ajuda no equilíbrio hídrico. Conforme Casseti (1991), a vegetação possui importância relevante na estabilização das vertentes com interceptação e dissipação da energia da água da chuva, influência na infiltração, escoamento hipodérmico, transpiração e evapotranspiração, variação da umidade e temperatura.

Em estudo sobre a Floresta da Tijuca no Rio de Janeiro, Coelho Netto (2005) aponta que a floresta apresenta uma estrutura funcional plena na regulagem dos processos hidrológicos e mecânicos, contribuindo para a estabilização das encostas. A eficiência da infiltração e percolação pode ser verificada quando são feitos cortes nesse tipo de paisagem, onde é comum a ocorrência de erosão interna (*pipings*) no maciço, pois a infiltração a montante torna-se eficiente em função das raízes da floresta, gerando cargas hidráulicas e, por consequência, gradientes importantes. Por outro lado, nos estágios pioneiro e inicial, ocorre apenas o funcionamento parcial desses processos. Pesquisas de campo de Deus (1991) e Cambra (1998), citados por Coelho Netto (2005), realizadas em encostas sob cobertura vegetal de gramíneas indicam que tal ambiente permite a infiltração das águas pluviais, todavia a zona radícula com densidade de raízes finas e pouco profundas (20 – 40 cm) resulta numa descontinuidade hidráulica logo abaixo da zona de enraizamento ou rizosfera. Com a desaceleração da percolação vertical da água na zona subjacente, menos enraizada, o topo tende à saturação, especialmente durante as chuvas mais intensas. Isso gera uma poro-pressão positiva que tende a provocar a instabilidade da vertente, resultando em deslizamentos. Assim, Coelho Netto (2005) aponta que os solos sob gramínea e outras espécies arbustivas ou arbóreas com raízes densas e pouco profundas tendem a ser altamente instáveis, potencializando a ocorrência de deslizamentos. Vem ao encontro dessas observações como elemento auxiliar no desencadeamento das instabilizações do maciço o fato de que, quando sob o efeito de elevadas sucções, o volume da fase ar no solo, geralmente contínuo e muitas vezes importante, é colocado sob pressão positiva, dificultando, a partir de certo momento, a infiltração e atuando como empuxo sobre a camada de solo sobrejacente saturada ou quase saturada, o que favorece os deslizamentos.

Vale considerar, portanto, como aponta Carvalho (1999), que a manutenção da encosta, explicada por geomorfólogos por um equilíbrio dinâmico e pelos engenheiros pelo fator de segurança, pode variar pela ação do clima com a impregnação de águas pluviais. Assim, mesmo sem intervenção antrópica, mas sem desconsiderar os agravantes dessa intervenção,

o fator de segurança pode sofrer gradual mudança ao longo do tempo, especialmente com a alteração dos minerais que compõem o maciço sobre o qual está esculpido o talude. Alguns taludes possuem um arranjo do meio físico que lhes confere um alto fator de segurança natural, exigindo, em casos de intervenções de engenharia, pouca ou nenhuma obra de contenção. Por outro lado, taludes com fator de segurança naturalmente baixo exigem, quando submetidos a obras, vários tipos de contenção: muros de arrimo, cortinas atirantadas, terra armada, dentre outros.

Casseti (1991) aponta que o espaço, com seu preço determinado pela lei do mercado, traduzida pela especulação imobiliária, reserva compartimentos vulneráveis à ocupação clandestina daqueles que não podem pagar pela terra e muito menos custear as obras de contenção necessárias para garantir o fator de segurança dos taludes. Além disso, considerando a diminuição natural do fator de segurança por alterações mineralógicas do maciço, mesmo obras elitizadas e com cautela geotécnica podem estar vulneráveis em compartimentos do relevo como os "mares de morros". Um exemplo muito esclarecedor da modificação natural do fator de segurança pode ser verificado nos escorregamentos que ocorreram mesmo em áreas preservadas na serra catarinense, em 2008. Cabe esclarecer que o fator de segurança pode ter se alterado por fatores naturais externos ligados ao clima e internos ligados às características do maciço.

5.2 Influência dos processos de infiltração na formação do relevo

Será dada ênfase aqui às influências da infiltração da formação do relevo oriundas da intervenção antrópica. Não serão abordados os processos naturais nem as alterações provenientes de cortes e aterros. A ação antrópica intervindo no processo de infiltração e na alteração das propriedades e do comportamento do solo se dá de modo distinto no meio rural e no meio urbano.

No meio rural, a intervenção na superfície por meio do manejo, adubação, calagem e aplicação de defensivos agrícolas afeta, em um primeiro momento, as características da superfície frente à infiltração e erodibilidade do solo. Em uma segunda etapa, ao mudar as condições de fluxo e a qualidade da água de infiltração que transporta produtos químicos solubilizados ou não, podem gerar a degradação do maciço e o desequilíbrio de energia, favorecendo os deslizamentos e a modelagem do relevo. Logo, configura-se um quadro em que a infiltração modela o relevo em área rural.

No meio urbano, as impermeabilizações afetam de modo marcante o balanço hídrico, a infiltrabilidade e a distribuição da infiltração. Isso pode ser agravado pela infiltração de águas servidas devido à sua carga química e à possibilidade de degradação do maciço. Em área urbana, mesmo que se evite a infiltração excessiva de água nas vertentes, seja ela contaminada ou não, ainda assim a simples impermeabilização por meio da ocupação do solo pode alterar a umidade de equilíbrio do maciço devido a fluxos oriundos de outras áreas, inclusive do próprio subsolo, desencadeando instabilizações e deslizamentos.

O problema é complexo e está longe de oferecer um entendimento mais consistente dos fenômenos desencadeadores dos deslizamentos modeladores do relevo por ação antrópica. Cabe aqui lembrar Lima (2003), que, estudando o processo evolutivo de ravinas e voçorocas

no Distrito Federal, concluiu que alterações do maciço podem ocorrer em curto intervalo de tempo (alguns anos), comprometendo a estabilidade de taludes.

Finalmente, cabe destacar que a possível causa do problema é a infiltração sem controle, sem critério. Por outro lado, preservar a capacidade de infiltração das áreas naturais e promovê-la de forma compensatória, mediante estudos prévios, constituem hoje elementos de grande relevância no combate a problemas como erosões, alagamentos e inundações.

6 Considerações finais

O conteúdo deste capítulo deixa clara a importância da geomorfologia para os processos de infiltração e desta como modeladora do relevo. O tratamento das questões socioambientais requer a consideração da geomorfologia e de sua dinâmica natural e antropizada, reforçando que o seu entendimento deve ser tratado no âmbito multidisciplinar, com ênfase na transdiciplinaridade.

Referências bibliográficas

BOTELHO, R. G. M. (1999). Planejamento em microbacia hidrográfica. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). Erosão e Conservação dos Solos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 269-300.

BRASIL, *Lei nº. 9.433*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Brasília, Janeiro de 1997.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. (2006). Processos erosivos. *In*: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M; MELO, M. T. S.. (Org.). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília: Finatec, p. 39-91.

CASSETI, V. (1991). Ambiente e apropriação do relevo. São Paulo: Contexto, 1991.

CASSETI, V. (1994). Elementos de geomorfologia.Goiânia: Editora da UFG,1994

CASSETI, V. (2005). Geomorfologia. Disponível em: <http://www.funape.org.br/geomorfologia/>. Acesso em: 02 de jan. 2012.

CARVALHO. E. T. (1999). Geologia urbana para todos: uma visão de Belo Horizonte. Belo Horizonte.

CHRISTOFOLETTI, A. (1982). Geomorfologia. São Paulo: Ed. Edgard Blucher.

CHRISTOFOLETTI, A. (1979). Análise de sistemas em geografia. São Paulo: HUCITEC, 1979. p.106.

COELHO NETTO, A. L. (1995). Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

COELHO NETTO, A. L. (2005). A interface florestal-urbana e os desastres naturais relacionados à água no maciço da Tijuca: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio-ambiental. Revista do Departamento de Geografia, 16, p. 46-60.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (1996). Degradação ambiental. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Org.). Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 337-379

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. (2001). Novo dicionário geológio-geomofológico. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

GUERRA, A. J. T. (2003). Encostas e questão ambiental. *In*: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. A Questão ambiental: diferentes abordagens. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

HUBP, J. L. (1989). Dicionário geomorfológico. México: UNAM, Instituto de Geografia.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. (1998). Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 131-152.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. (1991). Ocupação de encostas. São Paulo: IPT, 1991.

JESUS, A. S.; LOPES, L. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2009) Aspectos conceituais sobre erosão linear. *In:* SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 8, 2009, SÃO PAULO. São Paulo, SP: ABGE.

JORGE, Fr. N.; UEHARA, K. (1998). Águas de superfície. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. de (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 101-109.

KING. L. (1953). Canons of landscape evolution. Bull. Geolog. Society of América. Washington, DC, 64(7): p. 721-732.

KING. L. (1956). A geomorfologia do Brasil oriental. Revista Brasileira de Geografia, ano 18, n. 2. p. 3-119, abr./jun.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília, DF: UnB. 336 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DT – 017A/03.

LUIZ, G. C. (2012). Relação solo/atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – município de Goiânia/GO. Brasília, DF: UnB, 271 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD – 075A/2012.

MOREIRA, C. V. R.; PIRES NETO A. G. (1998). Clima e relevo. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 69-85.

NOVAES PINTO, M. (1993). Caracterização geomorfológica. *In*: NOVAES PINTO, M. Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília: EdUNB. Cap. 9, p. 285-320.

PENCK, W. (1924). Die morphologische analyse. Stuttgart: J. Engelhorn's Nachf.

RESTREPO, J. M. S. (2010). Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Brasília, DF: UnB. 183 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM - 188/10.

REZENDE, M.; CURI, N; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, J. F. (1995) Pedologia: base para distinção de ambientes. Viçosa: Neput.

ROSS, J. L. S. (1996). Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMAs. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 291-336.

SILVA, J. P. (2012). Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos. Brasília: Brasília, DF: UnB, 211 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-074A/12.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; BARBOSA,S. A. B. (2007). Mapa de infiltração do Alto e Médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos da paisagem. *In*: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 1, 07 a 09 nov. 2007, Taubabé, SP. Anais...: IPABHi. p. 83-90.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, T. R.; MELFI, A. J. (2000). Intemperismo e formação do solo. *In*: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAERCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos.

TRICART, J. (1957). Mise em point: l'évolution des versants. L'information geographique, (21): p. 108-115.

VITTE, A. C. (2001) Considerações sobre a teoria da etchplanação e sua aplicação nos estudos das formas de relevo nas regiões tropicais quentes e úmidas. Terra Livre, São Paulo, n.16, p.11-24, 1º semestre.

VITTE, A. C. (2005). Etchplanção dinâmica e episódica nos trópicos quentes e úmidos. Revista do Departamento de Geografia, 16, p. 105-118.

Capítulo 5
Aspectos geológicos e infiltração

Noris Costa Diniz
Patrícia de Araújo Romão
Hernan Eduardo Martinez Carvajal

1 Introdução

A água é a substância mais abundante da Terra. Participa dos processos modeladores da paisagem, por meio da dissolução dos materiais terrestres e do transporte de partículas (erosão hídrica, rios e gelo), sendo o melhor e o mais comum solvente na natureza, com papel essencial no intemperismo químico pela hidrólise. No planeta Terra, a água se distribui nos oceanos (94%), nas águas subterrâneas (4%), nas geleiras e capas de gelo (2%), nos lagos, rios, pântanos e reservatórios artificiais (< 0,01%), na umidade dos solos (< 0,01%), na biosfera (< 0,01%) e na atmosfera (< 0,01%) (KARMANN, 2000). Com base nesse fato, percebe-se a importância da água que infiltra no solo, a qual consiste em um dos componentes do ciclo hidrológico.

2 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico, no tempo geológico, pode ser um ciclo rápido ou lento (Figura 1). O ciclo rápido, que ocorre em curto prazo, envolve a dinâmica externa da Terra e depende da energia solar e gravitacional. Nele a água é consumida nas reações fotoquímicas e retida na produção de biomassa vegetal. Nesse ciclo o retorno da água ao sistema se dá pela respiração, reação contrária à fotossíntese.

O ciclo lento, em longo prazo, é movimentado pela dinâmica interna da Terra, associada à Tectônica de Placas. O consumo de água ocorre no intemperismo químico (hidrólise) e na formação de rochas sedimentares e metamórficas (minerais hidratados). Nesse ciclo o retorno se dá por meio da água juvenil, pelo vulcanismo.

Os estudos que envolvem o ciclo hidrológico têm como finalidade prática a avaliação e o monitoramento da quantidade de água disponível na superfície terrestre. A unidade geográfica para esses estudos é a bacia hidrográfica, que pode se definida como um sistema físico que possibilita a quantificação do ciclo da água e consiste na área de captação da água de precipitação, delimitada em superfície por divisores topográficos. Desses divisores, toda a água captada converge para um único ponto de saída (KARMANN, 2000).

É importante observar que o divisor das bacias hidrográficas superficiais nem sempre corresponde à borda dos sistemas aquíferos representados por formações geológicas, litologias e maciços rochosos que armazenam água. Inclusive, pode haver casos em que a direção e o sentido do fluxo de água subterrânea divergem daquele das águas superficiais. A água que infiltra no solo e passa a ocupar espaços vazios em formações rochosas ou no manto de intemperismo (regolito) é considerada a água subterrânea (Figura 2).

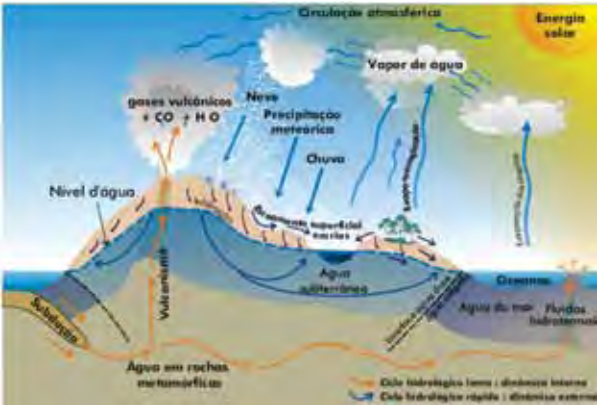


Figura 1. Sistema do ciclo hidrológico (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

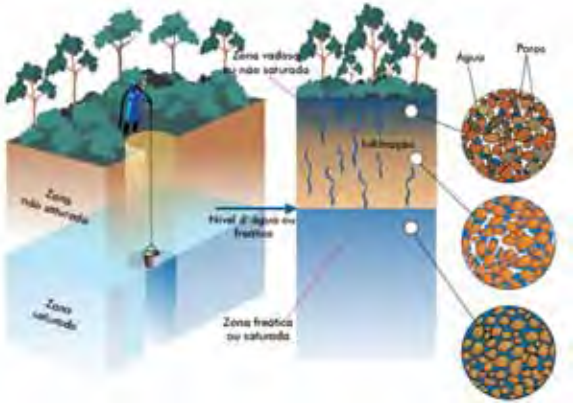


Figura 2. Distribuição da água subterrânea no solo (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

A água infiltrada percorre um caminho pelo subsolo que depende da força gravitacional e das características dos materiais presentes, além do controle pela atração molecular e pela tensão superficial. Dentre as características dos materiais, tanto dos materiais inconsolidados quanto do substrato rochoso, destacam-se o tamanho e o tipo dos poros, o grau de comunicação entre eles e as condições de umidade. Esses e outros fatores controlam o armazenamento e o movimento das águas subterrâneas. Assim, conforme o tamanho do poro, a água pode ser adsorvida, sofrer ação da tensão superficial, ou ainda da gravitacional, sendo este último o caso da percolação por poros maiores (AZEVEDO e ALBUQUERQUE FILHO, 1998; KARMANN, 2000).

A capacidade de campo é o volume de água que é absorvido pelo solo antes de atingir a saturação e que não sofre movimento para os níveis inferiores (KARMANN, 2000). O limite entre a zona saturada (ou freática), na qual todos os poros estão cheios de água, e a zona não saturada (vadosa ou de aeração), na qual os espaços vazios estão preenchidos parcialmente por água e também por ar, consiste no nível ou na superfície freática. Quando esse nível intercepta a superfície do terreno, aflorando, gera nascentes, córregos ou rios, alimentando os cursos d'água efluentes (Figura 3a).

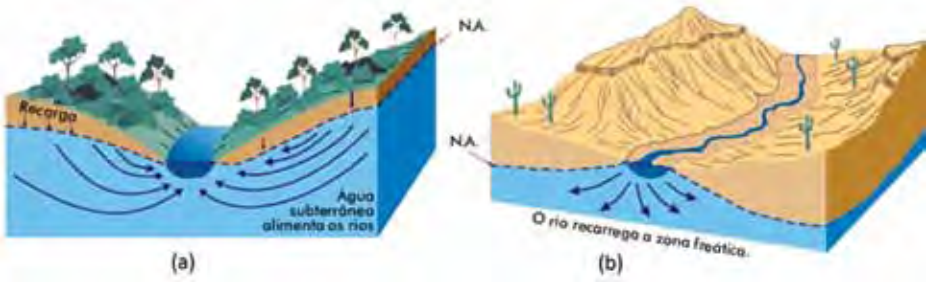


Figura 3. Rios efluentes (a) e influentes (b) conforme a posição do nível freático em relação ao vale (modificado de TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Após o movimento de infiltração a partir da superfície, o fluxo ou percolação consiste no movimento da água subterrânea nos meios permeáveis, gerado pela força gravitacional e pelo potencial hidráulico. O potencial hidráulico é gerado pela diferença de pressão hidrostática entre os pontos, com distintas alturas de coluna d´água. O movimento da água é gerado dos pontos de maior potencial (crista do nível freático) para os pontos de menor potencial (fundos de vale).

Como já discutido, as características dos materiais, principalmente a porosidade e permeabilidade, podem ser favoráveis ou não à infiltração da água. Materiais porosos e permeáveis, como solos e sedimentos arenosos, ou rochas expostas muito fraturadas permitem e favorecem a infiltração de águas superficiais. Ao contrário, rochas cristalinas pouco fraturadas e materiais argilosos, não porosos, são desfavoráveis à infiltração. Em regiões tropicais, espessas coberturas de solo atuam no controle da infiltração, pois retêm temporariamente a água, liberando-a lentamente ao substrato rochoso. Abordam-se, nos itens a seguir, as propriedades de porosidade e permeabilidade e os tipos de aquíferos, os aspectos geológicos que interferem no processo de infiltração e exemplos de aquíferos existentes no Brasil.

3 Porosidade, permeabilidade e tipos de aquíferos

A porosidade, propriedade física de um material, é um termo usado para caracterizar os poros existentes nos materiais. De acordo com a porosidade, os materiais podem ser classificados como sendo de porosidade primária, a qual ocorre no sedimento ou rocha. Nas rochas sedimentares, essa porosidade é caracterizada pelos espaços vazios entre os grãos, a porosidade intergranular. O tamanho, a forma, o grau de seleção e a cimentação influenciam nesse valor. A porosidade secundária se desenvolve após a formação das rochas ígneas, metamórficas

ou sedimentares, por fraturamento ou falhamento, na fase de deformação, e os materiais são caracterizados como de porosidade fissural ou de fraturas.

Quando se trata do fluxo subterrâneo, a porosidade pode ser quantificada como porosidade total, definida pela relação entre o volume de vazios e o volume total considerado (Tabela 1), ou ainda como porosidade efetiva, que é uma parte da porosidade total, a qual reflete o grau de comunicação entre os poros.

Tabela 1. Volume de poros e o tamanho de partículas em sedimentos (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Material	Tamanho das partículas, mm	Porosidade %	Permeabilidade
Cascalho	7 a 20	35,2	Muito alta
Areia grossa	1 a 2	37,4	Alta
Areia fina	0,3	42	Alta a média
Siltes e argila	0,04 a 0,006	50 a 80	Baixa a muito baixa

Os aquíferos podem ser considerados como unidades geológicas que armazenam água subterrânea, sendo capazes de produzi-la. Quanto ao tipo de porosidade, é possível classificar os aquíferos como (Figura 4):

a) de porosidade intergranular ou granular, formados em espessas coberturas de solos, em rochas sedimentares clásticas, principalmente em rochas areníticas, que são consideradas excelentes aquíferos;

b) fissurais ou de fraturas, formados por deformação tectônica (falhas e dobras), que podem estar seladas, ou gerar vazios de proporções milimétricas, os quais podem ter sua dimensão ampliada, por exemplo, com o soerguimento do substrato rochoso em relação ao seu entorno, ou ainda com o alívio da carga litostática – as fraturas podem ainda estar associadas à origem não tectônica, como, por exemplo, às disjunções colunares em basaltos;

c) de condutos, pela porosidade cárstica, constituídos por uma rede de condutos, com diâmetros milimétricos a métricos, gerados por meio de dissolução de rochas carbonáticas, aos quais se associam grandes volumes de água (KARMANN, 2000).

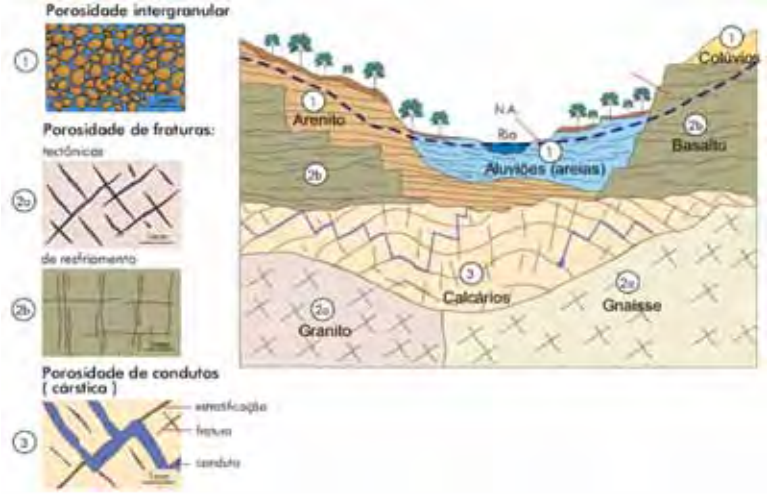


Figura 4. Tipos de porosidade segundo aspectos geológicos (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Quanto à produção e ao confinamento da água subterrânea, as unidades geológicas podem ser classificadas como:

a) Aquiclude: unidade formada por rochas que podem ser consideradas relativamente impermeáveis e que, apesar de saturadas, por terem absorvido água lentamente, são incapazes de transmitir um volume de água significativo, com velocidade suficiente para abastecer poços ou nascentes;

b) Aquifugo: unidade que não possui poros interconectados e que, por isso, não absorve nem transmite água;

c) Aquitarde: unidade rochosa com menor capacidade produtiva relativa, como em uma sequência estratigráfica do tipo arenito/siltito, em que o siltito corresponde ao aquitarde;

d) Aquíferos livres: aqueles cujo nível superior delimitado pelo nível freático sofre ação da pressão atmosférica, por contato, ocorrendo a poucos metros da superfície – correspondem, em geral, ao manto de intemperismo mais espesso;

e) Aquíferos suspensos: acumulações de água sobre os denominados aquitardes, presentes na zona não saturada, formando níveis lentiformes acima do nível freático principal;

f) Aquíferos confinados: aquele confinado entre duas unidades pouco permeáveis (aquitardes) ou impermeáveis, geralmente ocorrendo em maiores profundidades (KARMANN, 2000).

Logo, além do conhecimento da porosidade dos materiais, é necessário o entendimento da capacidade desses materiais em permitir o fluxo de água por esses poros, denominada de permeabilidade. Essa capacidade depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles. Com a redução do tamanho das partículas do solo, há um aumento da porosidade, mas ocorre uma diminuição da permeabilidade. Em um sedimento argiloso, por exemplo, apesar de existir alta porosidade, a permeabilidade é muito baixa, pois, nos poros muito pequenos, a água fica presa por adsorção.

Outro parâmetro importante a ser conhecido é a condutividade hidráulica, que é uma característica intrínseca do material. A diferença do potencial hidráulico em relação ao percurso do fluxo de água subterrânea é a condutividade hidráulica, a qual é expressa pela capacidade de transmissão de água, em função da inclinação do nível freático. O fluxo de água subterrânea é condicionado, não só pela inclinação do nível d'água e pela diferença de potencial hidráulico entre dois pontos, mas também pela permeabilidade do subsolo e pela viscosidade da água.

Do exposto, destaca-se que as características dos materiais, ou seja, os aspectos geológicos influenciam na porosidade, na permeabilidade e condutividade hidráulica. Em se tratando do substrato rochoso, o tipo de rocha presente e os eventos tectônicos condicionam, dentre outros parâmetros, a porosidade, a permeabilidade e a condutividade hidráulica desse substrato, influenciando, por sua vez, as condições dos aquíferos. Esses aspectos são abordados na próxima seção.

4 Aspectos geológicos dos aquíferos

As unidades rochosas ou os sedimentos, porosos e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea, passível de ser explorada pela sociedade, são chamadas de aquíferos (do latim "carregar água"). A disciplina Hidrogeologia encarrega-

-se dos estudos referentes aos aquíferos, quanto à exploração e à proteção das águas subterrâneas.

Quando a hidrogeologia de uma determinada região é descrita, sua descrição engloba desde o substrato rochoso até o material inconsolidado sobrejacente. Na presente seção, abordam-se principalmente os aspectos geológicos relativos ao substrato rochoso. A descrição dos aspectos de um substrato rochoso envolve informações sobre as rochas existentes, levando em conta o evento que deu origem a esse substrato e posteriores eventos associados à tectônica, aos quais porventura tenha sido submetido.

A litologia presente em determinada área é um dos condicionantes dos processos de infiltração e percolação da água subterrânea. Dentre os aspectos geológicos que interferem nesses processos, destacam-se: o tipo de rocha ou litologia; a textura e a estrutura, associadas a essa litologia, e a estrutura referente àquela gerada durante ou após a formação da rocha, incluindo os eventos tectônicos de dobramento e falhamento.

A textura da rocha pode ser definida como o conjunto de propriedades associadas à forma e ao arranjo geométrico dos constituintes, que se refletem na possibilidade ou não de visualização dos minerais e na granulação desde fina até grossa. Já a estrutura pode ser entendida como os aspectos observáveis no conjunto do maciço rochoso. A textura e a estrutura, juntas, refletem na existência de vazios e na conexão entre eles, associados à porosidade e à permeabilidade das rochas.

Quanto ao tipo litológico, segundo a origem, as rochas podem ser ígneas, sedimentares ou metamórficas, que podem ser descritas como a seguir, segundo suas condições texturais e estruturais.

a) Rochas Ígneas: são originadas a altas temperaturas, a partir da consolidação do magma. Dividem-se de acordo com suas condições de resfriamento, solidificação e cristalização. Assim, podem ser originadas desde rochas vulcânicas de granulação fina, até rochas plutônicas, que apresentam cristais de variadas dimensões, maiores quanto maior o tempo disponível para sua cristalização e resfriamento. A estrutura nessas rochas pode estar associada à formação ou não de descontinuidades (como as disjunções colunares) durante o resfriamento, ou ainda à existência de vesículas (vazios), relacionadas à presença de gases dissolvidos no magma quando de seu resfriamento. Como exemplos, podem ser citados os basaltos, que são rochas vulcânicas de granulação fina, as quais podem apresentar disjunções colunares, vesículas, dentre outras estruturas.

b) Rochas Sedimentares: têm origem a partir da sedimentação de fragmentos de rochas e minerais, denominada de clástica ou da precipitação química. No caso de sedimentos clásticos, a granulometria e a estrutura de uma rocha sedimentar estão associadas ao ambiente de erosão, ao transporte e à deposição dos sedimentos que, submetidos a determinadas pressões, em geral de soterramento, são posteriormente litificados. No caso de rochas sedimentares não clásticas, algumas vezes solúveis, que podem ser denominadas de químicas, organogênicas ou residuais, destaca-se o calcário, do qual se originam vazios por dissolução, formando por vezes cavernas. No caso de terrenos cársticos (formados em rochas calcárias), a ocorrência de cavernas pode dar origem a rios subterrâneos. Na origem sedimentar clástica, de acordo com os ambientes, as rochas sedimentares podem exibir estruturas de estratificação, relacionadas ao acamamento, por exemplo, em ambientes eólicos, fluviais, marinhos ou de geleiras. Os grãos que compõem esses tipos rochosos individualmente podem ser arredondados ou angu-

losos, próximos ou não ao formato de esfera, segundo o ambiente de transporte e deposição dos fragmentos. No contato entre os grãos pode ainda ocorrer cimentação. De acordo com a textura, associada à granulometria, as rochas podem ter grande quantidade de vazios intercomunicantes. Um exemplo de rocha sedimentar clástica consiste nas rochas areníticas, que são, em geral, aquíferos produtivos quanto à vazão.

c) Rochas Metamórficas: são advindas de transformações sofridas pelas rochas sedimentares, ígneas ou mesmo metamórficas. Essas transformações fazem com que os cristais fiquem orientados segundo orientação preferencial, dando origem a estruturas como aquelas denominadas de foliação metamórfica. Para que essas transformações ocorram, são necessárias condições de altas temperatura e pressão, de altas temperaturas ou de altas pressões. Essas condições equivalem à ocorrência de eventos tectônicos, como é o caso do metamorfismo regional quando associado a dobramentos; metamorfismo dinâmico, quando associado a falhamentos, e metamorfismo de contato, quando associado, por exemplo, ao contato entre a rocha encaixante e uma intrusão ígnea. Esses eventos podem ainda ocorrer de forma associada. Nesses tipos de rocha, os vazios formados associam-se a descontinuidades geradas durante esses eventos tectônicos.

Assim, após a ocorrência de uma precipitação, a água de infiltração passa pelo material inconsolidado e chega ao substrato rochoso, onde encontra condições bastante diferentes, modificando, assim, as características do fluxo da água subterrânea. A água que atinge o substrato rochoso ocupa então os vazios de acordo com o tipo litológico.

Como é possível observar, dependendo do tipo de rocha, o substrato rochoso pode ter propriedades distintas quanto à textura e à estrutura. Por exemplo, quando o substrato rochoso é formado por rochas metamórficas, como já descritas, sua estrutura pode variar de acordo com a existência de fissuras, falhamentos ou fraturamentos, abertos ou não, o que interfere na porosidade e na permeabilidade desse substrato, dependendo da existência ou não de conexão entre os vazios correspondentes.

No caso de rochas sedimentares clásticas, é comum que existam maiores porosidades e permeabilidades, em comparação com outro tipo rochoso, por causa do arranjo entre os grãos, pois, no caso das rochas areníticas, quando os grãos são bem selecionados e arredondados, os poros são maiores. Se pouco selecionados, os grãos menores podem preencher os vazios deixados pelos maiores, diminuindo, assim, tanto sua porosidade quanto sua permeabilidade. As estruturas de acamamento podem também aumentar a porosidade e a permeabilidade, quando da deposição diferenciada dos grãos de acordo com as condições de sedimentação, formando, por exemplo, linhas de pedra, o que modifica o formato e o tamanho dos vazios, de uma camada para outra. Quanto às rochas sedimentares químicas, como é o caso das rochas calcárias, os vazios associam-se principalmente à magnitude das cavidades geradas no processo de dissolução. No caso de rochas ígneas, em que é frequente a ocorrência de fissuras associadas ao resfriamento, podem ser originados vazios conectados ou não, de acordo com as características das aberturas geradas.

Comparativamente, os sedimentos inconsolidados, como cascalhos e areias, as rochas sedimentares clásticas, como arenitos, conglomerados e alguns calcários, bem como rochas vulcânicas, plutônicas e metamórficas com alto grau de fraturamento, em geral consistem em bons aquíferos, com média a alta condutividade hidráulica (KARMANN, 2000; FEITOSA *et al*., 2008).

Outro assunto que poderia ser abordado refere-se aos principais processos de geodinâmica superficial, condicionados pela ação da água subterrânea nos solos e nas rochas. Tais processos estão ligados, por exemplo, à pedogeoquímica e à pedogênese, aos movimentos gravitacionais de massa, como a solifluxão, à erosão interna, ao solapamento, aos deslizamentos e à carstificação (KARMANN, 2000).

A partir do exposto, a seguir são apresentados alguns estudos de caso, envolvendo os aspectos hidrogeológicos em duas distintas escalas de abordagem.

5 Estudo de caso: Distrito Federal

Segundo Campos (2004), no Distrito Federal são definidas como áreas de recarga regionais as regiões com relevo plano e elevado (região de Chapadas Elevadas), recobertas por solos de textura média a arenosa com elevada capacidade de infiltração. Nessas áreas, um volume superior a 20% da precipitação total infiltra através da zona vadosa do domínio poroso, para recarregar a zona saturada do domínio aquífero fraturado (ZOBY, 1999 e CARMELO, 2002, citados por CAMPOS, 2004).

Com a ocupação e consequente impermeabilização da superfície, o volume infiltrado diminui significativamente, resultando em um aumento do fluxo superficial total pela interceptação artificial. Como a recarga natural dos aquíferos se dá a partir da infiltração da água de precipitação pluviométrica, através da zona vadosa do aquífero, até alcançar sua zona de transição e ocupar a porção saturada do domínio rochoso, a expansão urbana causa a impermeabilização de grandes áreas (ruas, passeios, coberturas de residências etc.), além de drástica redução da infiltração natural e aumento do fluxo superficial total (*run off*), resultando na diminuição da recarga natural dos aquíferos. Esse fato já pode ser observado em condomínios da região da cidade de Sobradinho-DF. Como exemplo, pode-se citar o caso do Condomínio Alto Bela Vista, onde um poço com vazão de 10.000 l/h, em 1992, passou a uma vazão de cerca de 3.500 l/h no ano 2000.

Para minimizar esse impacto sobre o sistema natural, Campos (2004) recomenda o desenvolvimento da prática de recarga artificial dos aquíferos, abordada em outro capítulo, que consiste em qualquer processo que induza infiltração ou injeção de água nos aquíferos, podendo ser realizada por meio de caixas ou barragens de infiltração, espalhamento de água sobre o solo, sulcos paralelos às curvas de nível, poços de injeção etc. (FETTER, 1994, citado por CAMPOS, 2004).

Além de outras razões, como a disponibilidade hídrica subterrânea no Distrito Federal é limitada, esse recurso deve ser utilizado de forma estratégica para objetivos específicos. O mau uso e a ocupação inadequada do solo determinam a necessidade de desenvolvimento de práticas de gestão dos sistemas aquíferos (Figura 5).

A proteção sanitária dos poços tubulares é a única forma de garantir a função filtro da zona vadosa dos aquíferos. Tanto o isolamento da porção rasa entre o revestimento e a parede do poço, quanto a manutenção de distâncias mínimas entre pontos potenciais de contaminação e os pontos de captação são medidas importantes para a proteção do aquífero. O controle da qualidade técnica das empresas construtoras de poços é uma medida eficaz para a gestão da qualidade das águas subterrâneas.

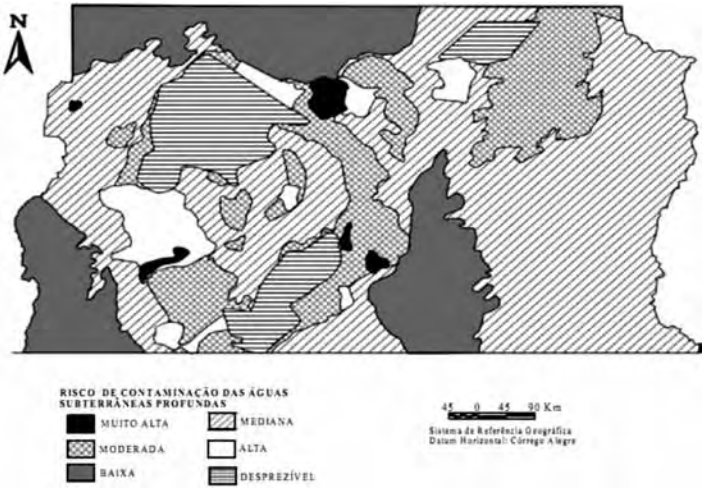


Figura 5. Mapa de risco de contaminação das águas subterrâneas profundas do Distrito Federal. (CAMPOS e FREITAS-SILVA, 1998).

A viabilização de sistemas de abastecimento misto com uso de mananciais subterrâneos e superficiais é uma prática que pode garantir a função reguladora dos aquíferos. Nesse sentido, a máxima derivação dos recursos hídricos subterrâneos deve ser feita durante os meses mais secos do ano, enquanto no período chuvoso, em função do superávit hídrico superficial, sua contribuição para o abastecimento deverá ser maior.

A implantação de sistemas de recarga artificial é fundamental para a estabilização do rebaixamento regional do nível estático, uma vez que a infiltração natural vem sendo limitada progressivamente com a urbanização, diminuindo a vazão de segurança. Esse processo é a única alternativa para a gestão racional do uso das águas subterrâneas na região, garantindo a autossustentabilidade do sistema aquífero fissural do Distrito Federal.

6 Estudo de caso: mapa de domínios aquíferos do Brasil

A partir da demanda identificada por necessidade da ANA (Agência Nacional de Águas), para delimitação de bacias hidrográficas, a ser adotada na outorga da água no Brasil, realizou-se, em 2003, a Oficina de trabalho SIG Hidrogeológico do Brasil, proposta e fomentada por Diniz *et al.* (2003), cujo resultado foi o Termo de Referência para a elaboração do Mapa Nacional, integrando-se a Geologia atualizada e georreferenciada, em SIG, e aplicando-se a normativa internacional de cartografia hidrogeológica da UNESCO/IAHS. Isso permitiu que, em 2006, o projeto fosse incluído no PPA e posteriormente no PAC, por Diniz *et al.* (2006), e tivesse sua coordenação executiva por Bonfim (2006-2007). O mapa (Figura 6) apresenta os grandes Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos em que foi dividido o território nacional, com suas potencialidades e limitações no que se refere à ocorrência de água subterrânea.

O conceito Domínio Hidrogeológico, como utilizado no mapa, foi adotado como sendo Grupos de unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas, definidos principalmente a

partir das características litológicas das rochas. Dentro do conceito utilizado, as unidades geológicas do país foram reunidas em sete grandes domínios hidrogeológicos:

a) Formações Cenozoicas;
b) Bacias Sedimentares;
c) Poroso / Fissural;
d) Metassedimentos / Metavulcânicas;
e) Vulcânicas;
f) Cristalino;
g) Carbonatos / Metacarbonatos.

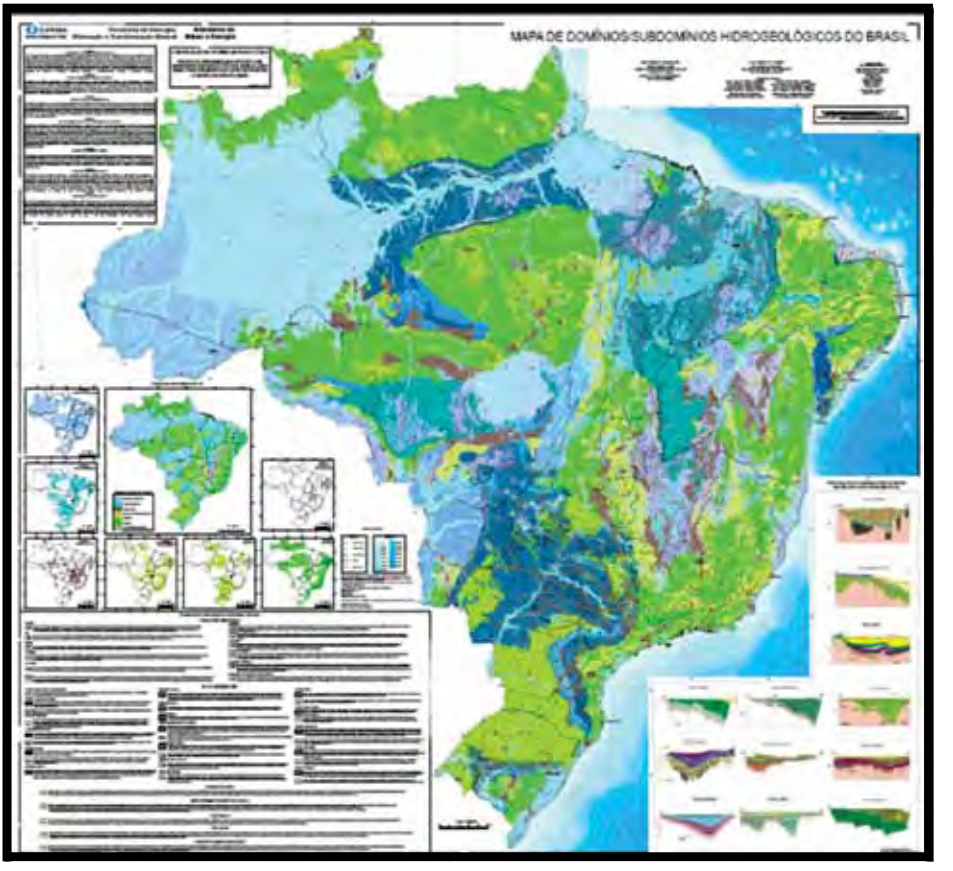


Figura 6. Domínios Aquíferos do Brasil (Bonfim – CPRM/SGM-MME, 2007).

7 Considerações finais

A infiltração das águas é um aspecto importante da gestão de aquíferos. A caracterização hidrogeológica dos aquíferos, como solos e rochas que são os repositórios das águas que infiltram, é a condição básica para essa gestão.

Caracterizar hidrogeologicamente um aquífero é conhecer suas dimensões geométricas, sua litologia, suas estruturas, seu fluxo subterrâneo, suas áreas de recarga naturais e os processos do meio físico, condicionados por aquíferos, com a noção de seus respectivos riscos à contaminação e ao rebaixamento do nível freático, avaliando-se assim os danos potenciais à sociedade, caso em sua gestão não sejam observadas tais características.

A gestão dos aquíferos apoia-se na base legal, na estrutura institucional, no conhecimento técnico-científico, no ensino e na transferência desse conhecimento em linguagem acessível ao universo do não especialista e na participação das comunidades de forma consciente e cidadã.

Somente dessa forma será possível a adoção de práticas adequadas que minimizem ou evitem a deflagração de problemas, atuando-se de forma preventiva quanto à gestão dos terrenos, nos seus aspectos dos solos e da infiltração das águas subterrâneas.

Referências bibliográficas

AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. (1998). Águas subterrâneas. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.). Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 111-130.

BONFIM, L. F. CPRM. (2007). Mapa de domínios aquíferos do Brasil. 1:1.000.000. 43 Folhas Cartográficas.

CAMPOS J. E. G.; FREITAS-SILVA F. H. (1998). Hidrogeologia do Distrito Federal. *In*: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I, v. II. IEMA-SEMATEC/ Universidade de Brasília. 66 p.

CAMPOS, J. E. G. (2004). Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Revista Brasileira de Geologia. v. 34, n. 1, p. 41-48, mar. 2004.

DINIZ, N. C. *et al.* (2006). Programa pluri anual PPA: projeto SIG hidrogeológico do Brasil. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM – Ministério de Minas e Energia – MME.

DINIZ, N. C. *et al.* (2003). Termo de referência: SIG hidrogeológico do Brasil. Oficina SIG – Hidrogeológico do Brasil. Rio de Janeiro: CPRM.

FEITOSA, A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (2008). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. CPRM. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 812 p.

KARMANN, I. (2000). Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. *In*: TEIXEIRA W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos. p. 113-138.

TEIXEIRA W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (2000). Decifrando a terra. São Paulo: Oficina de Textos.

Capítulo 6
A infiltração e o escoamento superficial

Klebber Teodomiro Martins Formiga
Ana Carolina Seibt
Thiago Quintiliano de Castro
Ricardo Silveira Bernardes

1 Introdução

A infiltração e o movimento da água do solo desempenham um papel fundamental no escoamento superficial, na recarga do lençol freático, na evapotranspiração, na erosão do solo e no transporte de produtos químicos em águas superficiais e subterrâneas (MAIDMENT, 1993). Por esse motivo, a sua compreensão é importante em diversas áreas do conhecimento, como Geotecnia, Agronomia, Geografia, Geologia e Hidrologia.

Dentro dos processos hidrológicos, após a precipitação, a infiltração é o principal fenômeno relativo à geração do escoamento superficial. No entanto, esse processo é o que sofre mais alterações devido às ações antrópicas, seja pelo desmatamento, com o desnudamento do terreno e a incrustação do solo, frequente em zonas rurais, seja pela impermeabilização quase total da superfície do terreno por materiais como cimento e asfalto, fato comum em regiões urbanas.

Essas alterações modificam consideravelmente o escoamento superficial seja pelo aumento das vazões de pico nos períodos chuvosos, que são decorrentes da impermeabilização do solo, seja pela redução ou extinção da vazão de base em períodos de estiagem, visto que a recarga do lençol freático foi comprometida e o seu nível rebaixado.

Este capítulo apresenta um apanhado sobre o processo de infiltração utilizado em estudos hidrológicos e os principais modelos matemáticos que são utilizados na modelagem hidrológica da infiltração.

2 Definições

Serão definidos a seguir os termos utilizados neste capítulo, suas notações, dimensões e unidades usuais.

A **Infiltração** é definida como o fenômeno de entrada na superfície do solo da água proveniente da chuva, neve derretida ou irrigação (MAIDMENT, 1993).

A **percolação** é o processo pelo qual a água se movimenta dentro do solo, normalmente, na direção da força da gravidade. Os dois processos, infiltração e percolação, não podem ser estudados separadamente, uma vez que eles são mutuamente interferentes. A água que perco-

la no solo é proveniente da infiltração; ao mesmo tempo, para que haja infiltração é preciso que o solo tenha uma capacidade de absorver a água, o que é regido pela percolação.

A **taxa de infiltração** (*f*) é a razão com que a água entra na superfície de solo por unidade de tempo. Em Hidrologia, ela é expressa em lâmina d'água por tempo (LT^{-1}), sendo as unidades mais usuais *mm/h* e *mm/min*.

A **infiltração acumulada ou total infiltrado** (*F*) indica o volume total infiltrado no terreno entre um tempo inicial t_o até um tempo *t* qualquer. As unidades mais comuns empregadas para infiltração acumulada são *mm* e *cm*.

Numericamente, a relação entre taxa de infiltração e total infiltrado é dada por:

$$F(t) = \int_{to}^{t} f(t)\, dt \tag{1}$$

ou

$$F(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{2}$$

A **capacidade de infiltração** (f_s) é a máxima taxa que um solo pode absorver de água através da sua superfície em um tempo específico t. A capacidade de infiltração do solo varia ao longo de em evento de precipitação, diminuindo até atingir um valor constante.

Potencial capitar ou **mátrico** (φ) é a carga hidráulica devido às forças capilares do solo e é dada em centímetros. É também conhecida como pressão negativa ou capilar.

Condutividade Hidráulica (***K***) é definida como a taxa de escoamento da água através do solo sob um gradiente hidráulico unitário. Essa taxa depende da taxa de umidade do solo e tem unidade dada em LT^{-1}. Quando o solo encontra-se saturado, essa variável é denominada **Condutividade Saturada** ($\boldsymbol{K_s}$)

3 Movimento de água através do solo

Para compreensão da modelagem matemática da infiltração no solo, é preciso entender fisicamente o que ocorre dentro do solo. A entrada de água dentro do solo é governada juntamente por duas forças: capilaridade e gravidade. O somatório dessas duas forças constitui o potencial hidráulico. Por definição física, a direção do fluxo da água será sempre para o ponto de menor potencial energético. Em solos saturados, a gravidade apresenta maior importância. Ela age no sentido vertical, forçando a água para baixo. Quando o solo atinge a saturação, os espaços entre os poros estão completamente preenchidos e o movimento da água nesta situação ocorre mais rapidamente (SINGH, 1989).

As forças capilares são mais forte em solos não saturados. Embora as forças capilares e gravitacionais atuem de modo a mover a água para baixo, a ação da capilaridade pode também desviar o fluido lateralmente.

No processo de movimento da água, ocorrem dois fenômenos simultaneamente: umedecimento do solo e movimento da água. Para que ocorra transporte de água, é preciso que, na parcela onde ocorre o fluxo, haja um aumento da umidade. Esse aumento de umidade provoca o aparecimento de um diferencial de umidade que cria uma frente de molhamento. O teor de umidade abaixo da frente é ainda baixo, enquanto o solo acima está próximo da

saturação. Além disso, as forças capilares ainda provocam um efeito de sucção na fronteira molhada (TODD e MAYS, 2005).

Assim, a distribuição da água em um perfil de solo uniforme, submetido a uma pequena carga hidráulica na superfície, pode ser representada conforme a Figura 1. No perfil de umedecimento, podem ser separadas quatro zonas: saturação, transição, transmissão e umedecimento (BRANDÃO *et al.*, 2003).

Na zona de saturação, o solo encontra-se completamente saturado e abrange a parte imediatamente abaixo do solo com uma espessura de 1,5 cm. Na zona de transição ocorre uma diminuição da umidade até atingir umidade abaixo da saturação (umidade efetiva), que fica praticamente constante ao longo da zona de transmissão. A zona de transição tem uma espessura de aproximadamente 5 cm, ao passo o tamanho da zona de transmissão ou transporte é variável, aumentando ao longo do tempo enquanto houver umidade na superfície (BRANDÃO *et al*, 2003). A frente de umedecimento ou molhamento é composta por uma camada estreita onde há um grande diferencial do teor de umidade do solo, conforme comentado anteriormente.

Figura 1. Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração (adaptado de Brandão *et al.*, 2003).

4 Infiltração e escoamento superficial

Quando ocorre uma chuva em um solo seco, no início, o elevado gradiente potencial causa um movimento da umidade muito alto, uma vez que a capacidade de absorção da camada superior do solo nessa situação é muito elevada. Isso provoca uma capacidade de infiltração muito elevada no primeiro instante, que normalmente é superior à intensidade da precipitação. Assim, toda a precipitação inicial infiltra, e a taxa de infiltração neste caso é igual à intensidade da chuva (Figura 2).

Quando a chuva continua, a quantidade de água que entra no solo aumenta cada vez mais. Com isso, devido ao aumento da espessura da zona umedecida, ou seja, a distância entre a superfície do solo e a frente de molhamento, o gradiente de potencial cai. Nessa situação, a capacidade de infiltração é regida pelas forças capilares e gravitacionais na região de umedecimento e pela capacidade do solo em transportar a água nas zonas de transição e transmissão. Com isso, ocorre uma redução da capacidade de infiltração do solo, que em determinado momento ficará menor do que a intensidade da chuva, provocando, assim, um excesso de água na superfície que é a fonte do escoamento superficial (Figura 2).

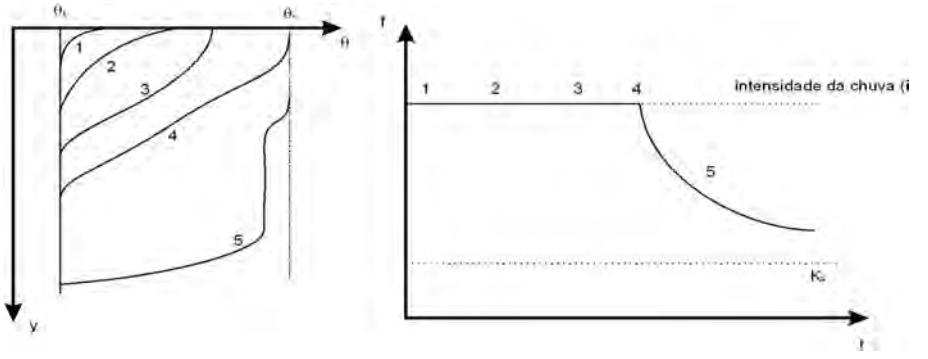


Figura 2. Comportamento hipotético da umidade no solo e da taxa de infiltração no solo durante uma chuva de intensidade constante (adaptado de SINGH, 1989)

Com a continuação da chuva, a espessura da camada saturada continua a crescer e o potencial hidráulico na superfície permanece diminuindo. Teoricamente, quando o tempo da infiltração tender ao infinito, o potencial de infiltração tende a depender apenas da parcela relativa à gravidade. Sob essas condições, a taxa de infiltração se aproximará da condutividade hidráulica para o solo saturado ($\mathbf{K}_s$).

Dentro do ciclo hidrológico, a infiltração é a responsável pela separação da água proveniente da chuva. Essa separação a torna um processo de grande importância para a compreensão da geração de escoamento na bacia.

4.1 Problemas da impermeabilização – geração do escoamento

O crescente processo de urbanização das cidades de todo o mundo, seja em países desenvolvidos ou em desenvolvimento, juntamente com o consequente aumento da impermeabilização e ocupação inadequadas de áreas ribeirinhas, tem promovido grandes problemas de inundações urbanas. A impermeabilização não só promove o agravamento de enchentes, mas também impede a recarga do lençol freático e favorece o aumento da temperatura local. Mesmo sendo em pequena escala, a mudança do clima pode tomar proporções maiores à medida que mais áreas vão sendo impermeabilizadas.

A redução da capacidade de infiltração provoca uma relação direta entre o aumento da impermeabilização e o incremento da vazão de pico (TUCCI e MARQUES, 2001). Assim, quanto mais urbanizada a área, maior frequência de inundações.

O ciclo hidrológico é um sistema fechado que rege toda a distribuição de água no planeta. É um sistema complexo que pode sofrer influências de alterações no meio. A urbanização é um dos elementos que pode alterar o ciclo hidrológico e, dessa maneira, a distribuição quantidade e da qualidade da água.

Naturalmente, parte da água precipitada sobre a terra sofre o processo de infiltração, transferência da água da superfície para o interior do solo. Mas, para que haja a infiltração, é necessário que o solo esteja suscetível a esse processo. Com a urbanização, tende a ocorrer a impermeabilização de áreas cada vez maiores, o que impede a infiltração e ocasiona grandes danos ambientais: promoção do aumento do escoamento superficial; impedimento da recarga do lençol freático, que é realizado através da infiltração; maior evaporação e menor evapotranspiração e aumento da temperatura, uma vez que as superfícies permeáveis absorvem o calor e o devolvem ao ambiente. Esse aumento da temperatura pode ainda promover o aumento de precipitações convectivas, pois favorece a movimentação do ar ascendente, implicando um aumento indireto das enchentes urbanas.

Outro problema fruto da impermeabilização do solo é a diminuição do tempo de concentração da bacia. O tempo de concentração é definido como o tempo que a água demora para se deslocar do ponto mais distante da bacia até a saída. Esse tempo, embora possa ser variável de um evento para outro, uma vez que a velocidade de escoamento é função da vazão e, consequentemente, do volume precipitado, é adotado como uma característica constante da bacia, sendo fruto de um evento extremo.

O tempo de concentração da bacia indica o grau de vulnerabilidade da bacia a cheias, pois, após esse período, toda a bacia estará contribuindo para a geração do escoamento. Quanto menor o tempo, menor deve ser a duração da chuva para que ocorra uma vazão máxima no local. Como existe uma relação inversa entre a intensidade da precipitação e a duração, a redução desse tempo aumentaria a magnitude da precipitação na bacia.

A redução do tempo de concentração tem a ver com o aumento da velocidade ocasionado pela redução da rugosidade do terreno que é fruto do processo de urbanização, tendo em vista a superfície original, composta por vegetação e com solo nu, foi substituída por asfalto e concreto.

Esse conjunto de fatores – redução da infiltração, aumento da quantidade de chuva que escoa e aumento da magnitude da precipitação em conjunto pode acarretar em um acréscimo de até seis vezes na vazão de cheia de um local. Esse incremento tem se evidenciado no aumento da recorrência de cheias em grandes centros urbanos, comuns durante o verão.

5 Modelagem matemática da infiltração

Nem toda precipitação que cai sobre o solo gera escoamento; pelo contrário, apenas uma pequena parcela desse montante chega aos rios – para a região Centro-Oeste, aproximadamente apenas 30% da chuva anual. No entanto, quando se trata de eventos isolados, a variação do escoamento pode variar de 0 a 100%, dependendo da intensidade da chuva, do tipo e uso de solo.

A identificação e quantificação dos fenômenos que regem esse sistema têm sido o foco dos pesquisadores da Hidrologia. Dentre os fenômenos que compõem o ciclo hidrológico,

um dos mais complexos é a infiltração da água no solo, visto que este é o responsável direto pela formação ou não do escoamento a partir da precipitação e desencadeia toda uma série de fluxos dentro ou fora do solo.

Dezenas de modelos de infiltração foram propostos e utilizados para análise hidrológica. Alguns desses modelos tornaram-se populares e estão presentes em vários sistemas de modelagem hidrológica, tais como: SWMM, HEC-HMS, TOPMODEL, Modelo da Heasted, Modelo do Mike. Esses modelos podem ser agrupados em duas classes principais: Modelos Empíricos e Modelos Conceituais. Alguns dos principais modelos utilizados serão descritos a seguir.

5.1 Modelos empíricos

Os modelos empíricos foram desenvolvidos através de experimentação e não consideram, diretamente no seu desenvolvimento, leis físicas. Os modelos apresentados neste trabalho são: Modelo de Horton e Modelo SCS (*Soil Conservation Service*).

5.1.1 Modelo de Horton

O modelo proposto por Horton (1940) é um dos mais conhecidos e empregados para o cálculo da infiltração dentro da Hidrologia. Horton (1940) identificou, por meio de experimentos de campo, que a capacidade de infiltração diminui, tendendo, com o tempo, a um valor estável. Ele considerou que a capacidade de infiltração do solo é influenciada mais por fatores que operam na superfície do que pelo processo de escoamento dentro do solo. Esses fatores poderiam ser: a expansão da parte coloidal do solo diminuindo os espaços entre as partículas; a selagem ou vedação do solo por partículas finas localizadas na superfície; ou ainda a compactação da superfície do solo desprovido de cobertura devido à energia cinética do impacto direto das gotas de chuva.

Horton (1940) apresentou formalmente a sua formulação para o comportamento da infiltração ao longo do tempo. Ele considerou que a variação da taxa de infiltração é inversamente proporcional à diferença entre a capacidade de infiltração *(f)* no momento *t* e uma capacidade de infiltração limite ou final (f_c) (Figura 3).

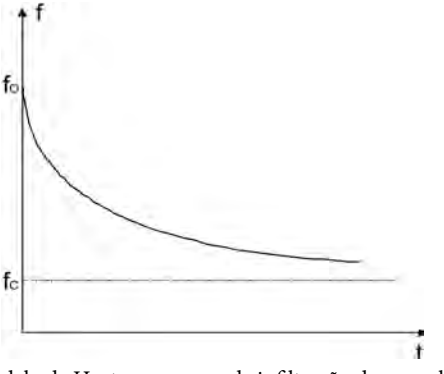


Figura 3. Parâmetros do modelo de Horton na curva de infiltração de um solo.

$$\frac{df}{dt} = a\,(f - f_c) \tag{3}$$

Rearranjando a equação diferencial, tem-se:

$$\frac{df}{(f - f_c)} = -\,adt \tag{4}$$

Integrando os dois termos entre o tempo inicial $t_o=0$ e t, obtêm-se:

$$Ln\,(f - f_c) - Ln\,(f_o - f_c) = a.\,t \tag{5}$$

em que f_o é a taxa de infiltração inicial. Rearranjando os termos, encontra-se a equação de Horton dada por:

$$f = f_c + (f_o - f_c)\,e^{-at} \tag{6}$$

em que a é a constante de decaimento que tem unidade mais usual h^{-1}.

A infiltração acumulada (F) no período é obtida pela integração da Equação (6).

$$F = f_c\,.\,t + \frac{1}{a}(f_o - f_c)\,(1 - e^{-at}) \tag{7}$$

Segundo Singh (1989), esse modelo é simples e se adequa bem a dados experimentais de campo. No entanto, esse bom ajuste é considerado como resultado no número de parâmetros da equação. Os parâmetros do modelo têm pouco significado físico e só podem ser obtidos por meio de experimentos de infiltração utilizando anéis concêntricos.

A principal limitação do método, segundo Tucci (1998), é que essa formulação só pode ser considerada quando a intensidade da chuva é maior do que a taxa de infiltração do solo, ou seja, sempre ocorre um excesso de água na superfície que gera escoamento.

5.1.2 *Modelo SCS (Soil Conservation Service)*

O modelo do SCS (1973) não é propriamente um modelo de infiltração, uma vez que ele faz parte de um método proposto pelo órgão para determinação de vazões de cheia em pequenas bacias, denominado Método do Número da Curva (Curva *Number*). Entretanto, a sua formulação tem sido amplamente empregada em modelos hidrológicos (SWMM, HEC-HMS, MIKE BASIN, etc.) como método de infiltração, pois, em algumas situações, apresenta um bom ajuste e utiliza poucos parâmetros no modelo.

O método proposto parte do princípio de que existe uma quantidade máxima de água que pode ficar armazenada no solo da bacia, denominada de armazenamento (S). Além disso, existe uma perda inicial (I_a) que deve ser superada para que ocorra escoamento. Essa perda está associada à interceptação na vegetação e ao armazenamento em depressões do terreno.

A razão entre o total infiltrado de água e o máximo armazenamento teórico é igual à razão entre a precipitação efetiva, ou escoamento (Q), e o máximo escoamento potencial, dado por $P - I_a$ (LINSLEY e FRANZINI, 1992). Assim:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{p - I_a} \tag{8}$$

em que P é o total precipitado.

A partir de diversos estudos experimentais, verificou-se que, para a maioria dos casos, as perdas iniciais correspondem a 20% do armazenamento (MAYS, 2010). Além disso, pela equação do balanço hídrico, tem-se que:

$$P = Q + I_a + F \tag{9}$$

Substituindo em (9), tem-se que:

$$F = P - 0{,}25 - \frac{(p - 0{,}25)^2}{p + 0{,}85} \tag{10}$$

O valor do armazenamento S é obtido pela equação:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{11}$$

sendo *S* o armazenamento em mm, e *CN* o número da curva, que é função do uso, da umidade e do tipo de solo. Os valores de CN são tabelados e podem ser encontrados em livros de Hidrologia e Recursos Hídricos (TUCCI, 1998; LINSLEY e FRANZINI, 1992; MAYS, 2010).

Embora seja de aplicação direta, o modelo SCS apresenta alguns problemas. A perda inicial pode ser considerada como válida para grandes tempestades; no entanto, para eventos menores, esse valor pode ser adotado como 0,1 ou até menos (SINGH, 1989).

Outro problema do método é que ele não considera explicitamente o tempo na sua formulação. Assim, não importa se o total precipitado ocorreu em uma hora ou um dia; o modelo desconsidera essa informação. Isso pode ser minimizado pela adoção da chuva de projeto do SCS; entretanto, para eventos fora dessa situação, o modelo pode perder eficiência.

5.2 Modelos conceituais

Os modelos conceituais são desenvolvidos a partir de equações baseadas em processos físicos do escoamento da água em meios porosos. Os principais modelos físicos gerais para esse tipo de escoamento são as Equações de Richards e a Lei de Darcy. Existem diversos métodos baseados nessas fórmulas. Os analisados neste tópico são o Modelo de Green-Ampt e o Modelo de Philip.

5.2.1 Modelo de Green-Ampt

O modelo de Green-Ampt (1911) foi um dos primeiros formulados para o cálculo da infiltração. Por necessitar de um método iterativo para resolver o problema em cada instante, esse procedimento foi pouco utilizado até meados dos anos 1970. Esse problema foi contornado com a utilização de computadores e, desde então, tem sido bastante difundido.

É um modelo baseado na Lei de Darcy para escoamento em meios porosos, que simplifica o padrão de perfilhamento da umidade do solo apresentado na Figura 1. Esse método considera a hipótese de que existe uma fina camada de água na superfície do solo que pode ter a carga hidráulica desprezada (h_o). Na frente de molhamento, ocorre uma redução abrupta da umidade inicial do solo e da umidade de saturação (Figura 4). A fronteira molhada tem uma profundidade L que foi atingida após um tempo percorrido *t*. Uma vez que o solo acima da frente de umedecimento continua saturado durante todo o processo, a condutividade hi-

dráulica adotada nesta condição á a saturada K_s. O conceito do modelo considera, ainda, que o perfil do solo é homogêneo e possui uma profundidade infinita.

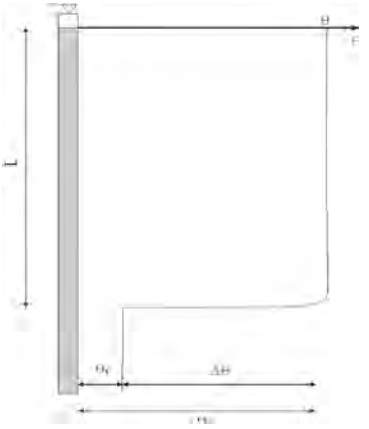


Figura 4. Simplificação do perfil de umidade no solo do modelo Green-Ampt.

Assim, considere-se uma coluna vertical de solo com área da seção transversal unitária com um volume de controle definido entre a fronteira de umedecimento e a superfície do solo (Figura 4). O solo, no início do evento, possui um teor de umidade θ_i. Na condição de saturação, a umidade será igual à porosidade do solo η. No instante *t*, quando a fronteira possui um comprimento igual a *L*, o total infiltrado pode ser tomado como sendo (TODD e MAYS, 2005):

$$F(t) = L(\eta - \theta_i) = L\Delta\theta \tag{12}$$

em que $\Delta\theta$ é a variação da umidade dada por $(\eta - \theta_i)$.

A lei de Darcy pode ser expressa como:

$$q = K\frac{\partial h}{\partial z} = -K\frac{\Delta h}{\Delta z} \tag{13}$$

Considerando o volume de controle da Figura 4, a vazão *q* que atravessa a superfície de controle é igual à *–f*. considerando os pontos de análise localizados na superfície e junto à fronteira molhada, tem-se que:

$$f = -K\frac{h_2 - h_1}{z_2 - z_1} \tag{14}$$

em que h_1 é igual à carga hidráulica na superfície que é considerada desprezível, a carga hidráulica no ponto 2 é a soma do potencial mátrico e da profundidade (– ψ – L). A distância entre os dois pontos $z_1 - z_2$ será igual à *L*. Com isso:

$$f = -K\frac{(-\psi - L)}{L} = K\frac{(\psi + L)}{L} \tag{15}$$

Analisando essa equação, verifica-se que o modelo considera que a infiltração é governada por dois gradientes, o matricial representado por ψ/L e a gravitacional L/L. À medida que o evento transcorre, o potencial mátrico vai diminuindo, visto que *L* tende a crescer, enquanto o gravitacional permanece constante e igual à unidade. Ou seja, a taxa de infiltração do evento tende a ser alta no início do evento, quando o solo está seco, aproximando assintoticamente da condutividade hidráulica para o solo saturado à medida que o tempo passa (BRANDÃO *et al.*, 2003).

Substituindo a equação (12) em (15) e fazendo $f = dy / dx$, tem-se:

$$\frac{dF}{dt} = K\,\frac{(\psi\,\Delta\theta + F)}{F} \tag{16}$$

A resolução do da equação diferencial ordinária (16) fornece a seguinte expressão:

$$F = Kt + \psi\Delta\theta Ln\left(1 + \frac{F}{\psi\Delta\theta}\right) \tag{17}$$

A equação (17) não tem solução analítica direta, devendo ser resolvida numericamente utilizando um processo iterativo para esse fim. Um método que tem sido recorrentemente utilizado é o de Newton, que, embora mais complexo que o de substituições sucessivas, converge mais rápido para esse problema (MAYS, 2010).

A capacidade de infiltração no momento pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$f = K\left(1 + \frac{\psi\Delta\theta}{F}\right) \tag{18}$$

Essa expressão só é validada quando a intensidade da chuva (i) é superior a taxa de infiltração, caso contrário $f = i$.

5.2.2 Modelo de Philip

O modelo proposto por Philip (1957) é baseado em uma solução numérica da equação de Richards empregando uma série de potencia de $t^{1/2}$. Esse modelo considera condições de solo semelhantes ao de Green-Ampt, ou seja, solo homogêneo, umidade inicial constante ao longo de uma coluna com profundidade infinita.

O método, também conhecido como Phillip de Dois Termos (SINGH, 1989), parte do princípio de que é possível, a partir da equação de Richards, encontrar um valor para o total infiltrado no instante t a partir da expressão:

$$F = f_1(\theta, D)\,t^{1/2} + f_2(\theta, D)\,t + f_3(\theta, D)\,t^{3/2} + \ldots + f_m(\theta, D)\,t^{m/2} \tag{19}$$

$f_1(\theta, D)$, $f_2(\theta, D)$ são funções da umidade inicial e da difusividade do solo. Para valores de t pequenos e escoamento predominantemente vertical, a equação pode ser truncada no segundo termo, que resulta em:

$$F = f_1(\theta, D)\,t^{1/2} + f_2(\theta, D)\,t = st^{1/2} + At \tag{20}$$

A primeira função é chamada de sortividade (s) do solo e indica a capacidade do solo homogêneo em absorver água em sua condição de umidade inicial (BRANDÃO *et al*., 2003). A segunda função representa teoricamente a condutividade hidráulica saturada do solo. Embora tenham significado físico, esses parâmetros são normalmente ajustados a partir de ensaios em campo (RIGHETTO, 1998).

A capacidade de infiltração no instante é obtida derivando-se no tempo a equação (20), da qual se obtém:

$$f = st^{-1/2} + A \tag{21}$$

A equação de Phillip tem sido empregada em modelos hidrológicos de eventos, em que o tempo de cálculo da infiltração se restringe à duração da chuva. Esse modelo apresenta como principal vantagem a existência de apenas dois parâmetros a serem determinados inicialmente.

6 Exemplo de aplicação

Para se avaliar o comportamento dos modelos enunciados neste trabalho, será feita uma análise do ajuste de cada um deles a um ensaio de infiltração realizado utilizando-se um simulador de chuva (CASTRO, 2011).

O ensaio foi realizado em uma parcela de 1 m² de superfície gramada, onde foi simulada uma chuva constante de intensidade igual a 180 mm/h. O escoamento superficial foi medido na saída da parcela, a cada minuto, utilizando-se um sensor de nível de água com *data logger*. Foi considerado que o tempo de percurso da água superficialmente dentro da parcela era muito pequeno e insignificante no processo. O resultado do experimento é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Dados da taxa de infiltração observada para uma chuva constante de 180 mm/h.

Tempo (min)	Taxa de Infiltração (mm/h)
0	180.0
1	180.0
2	180.0
3	142.1
4	133.5
5	129.8
6	124.3
7	124.3
8	120.0
9	119.4
10	118.2
11	117.0
12	115.1
13	114.5
14	113.9

Os modelos de infiltração foram implementados em uma rotina na plataforma MATLAB, e os seus parâmetros foram em seguida ajustados como se o resultado dos modelos fosse o mais próximo possível dos observados. Para o ajuste dos parâmetros, considerou-se o método da soma dos mínimos quadrados ajustados por um método de otimização baseado em algoritmos genéticos, presentes no próprio *software* utilizado.

Os resultados dos diferentes métodos considerados neste trabalho são apresentados a seguir.

6.1 Modelo de Horton

Os parâmetros do método de Horton ajustados aos dados observados foram: F_o = 189,8 mm/h; F_c = 102,5 mm/h e a = 3,1 h^{-1}. O coeficiente de determinação R^2 foi de 0,91. Os resultados do modelo são apresentados na Figura 5 e na Tabela 2.

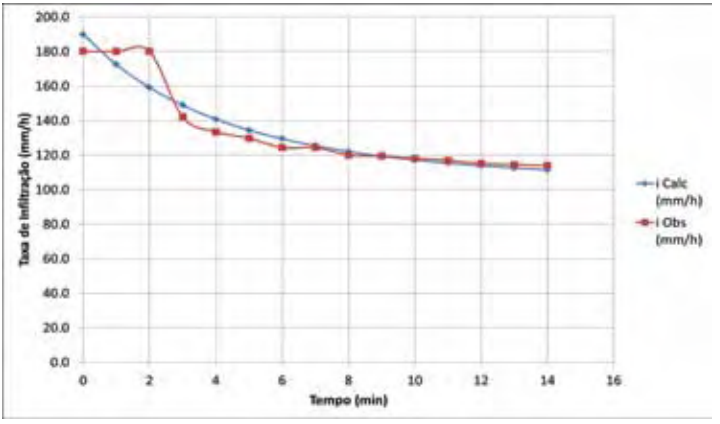


Figura 5. Taxa de infiltração calculada pelo método de Horton.

Verifica-se que os parâmetros F_o e F_c procuraram representar os extremos dos dados observados com o parâmetro *a* tentando ajustar o formato da descida. Por apresentar uma maior flexibilidade nos parâmetros, o método consegue um bom nível de ajuste. No entanto, verifica-se que para a fase inicial do evento, quando a taxa de infiltração é superior à capacidade de infiltração, o método não conseguiu reproduzir o comportamento da entrada da água no solo, embora a partir do tempo 4 minutos o ajuste dos dados tenha sido muito bom.

Tabela 2. Resultados do modelo de Horton para o evento de 180 mm/h.

t (min)	P (mm)	f (mm/h)	F (mm)	Q (mm)
0	0	189.8	0.00	0.00
1	3	172.5	3.00	0.00
2	6	159.1	6.00	0.00
3	9	148.8	9.00	0.00
4	12	140.8	12.00	0.00
5	15	134.5	14.97	0.03
6	18	129.4	17.78	0.22
7	21	125.3	20.53	0.47
8	24	122.1	23.23	0.77
9	27	119.4	25.88	1.12
10	30	117.2	28.49	1.51
11	33	115.3	31.05	1.95
12	36	113.8	33.57	2.43
13	39	112.5	36.05	2.95
14	42	111.4	38.49	3.51

6.2 Modelo SCS

O modelo SCS apresentou o melhor ajuste com os seguintes valores para os parâmetros: *CN* = 67 e *a* = 0. O coeficiente de determinação encontrado foi de 0,77. Uma comparação

entre os valores observados e calculados para a taxa de infiltração é apresentada na Figura 6. Os resultados numéricos do modelo são mostrados na Tabela 3.

Por ser uma parcela gramada com pouca irregularidade do solo, o efeito do armazenamento em depressões e da interceptação nas folhas é praticamente nulo, o que pode ser evidenciado por meio do parâmetro *a* nulo. Com isso, o modelo SCS tornou-se mais simples do ponto de vista da quantidade de parâmetros utilizados, uma vez que apenas o *CN* serviu para representar a infiltração. Isso resultou em um ajuste fraco com os valores observados, uma vez que o modelo não consegue reproduzir o ajuste exponencial, com uma queda acentuada da taxa de infiltração.

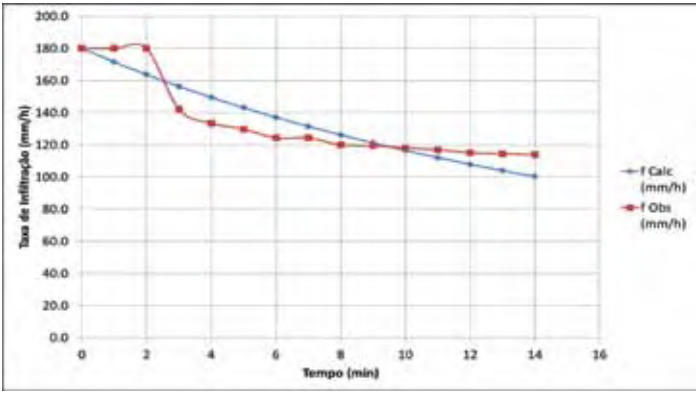


Figura 6. Taxa de infiltração calculada pelo método SCS.

Entretanto, para situações em que o tempo do evento e a área são maiores, em que o fenômeno da interceptação é mais preponderante e em que se apresente um nível de incerteza maior, o modelo pode ser adequado devido à sua simplicidade paramétrica.

Tabela 3. Resultados do modelo SCS para o evento de 180 mm/h.

t (min)	P (mm)	f (mm/h)	F (mm)	Q (mm)
0	0	180.0	0.00	0.00
1	3	171.6	2.93	0.07
2	6	163.7	5.72	0.28
3	9	156.4	8.39	0.61
4	12	149.5	10.94	1.06
5	15	143.1	13.38	1.62
6	18	137.1	15.71	2.29
7	21	131.5	17.95	3.05
8	24	126.2	20.09	3.91
9	27	121.2	22.16	4.84
10	30	116.5	24.14	5.86
11	33	112.1	26.04	6.96
12	36	107.9	27.87	8.13
13	39	104.0	29.64	9.36
14	42	100.2	31.34	10.66

6.3 Modelo de Green-Ampt

O modelo de Green-Ampt, embora tenha três parâmetros de ajuste (Δθ diferença entre a umidade inicial e de saturação, ψ potencial mátrico e *K* condutividade hidráulica), após uma análise fatorial, pode-se ter apenas dois parâmetros independentes: ψ Δθ *e K*. Os valores encontrados para o par de parâmetros foram: K = 97,2 mm/h e ψ Δθ = 4,62 mm. O coeficiente de determinação encontrado foi de 0,97. Os resultados são apresentados na Tabela 4 e na Figura 7.

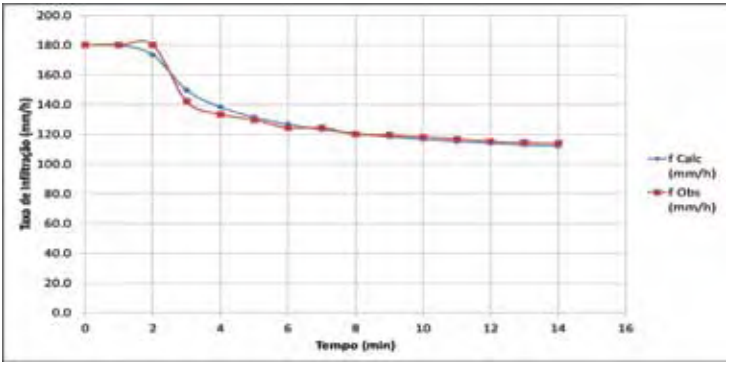


Figura 7. Taxa de infiltração calculada pelo método Green-Ampt.

Dentre os modelos testados, o Green-Ampt foi o que mostrou melhor ajuste aos dados observados, pois apresentou bom comportamento tanto na fase inicial do processo de infiltração, quanto na fase de desenvolvimento. O modelo apresenta uma grande vantagem em relação aos demais, pois os seus parâmetros têm significado físico e podem ser obtidos diretamente em campo. No entanto, ao se defrontar com solos heterogêneos ou estratificados na profundidade, é preciso recorrer a modelos modificados que conseguem trabalhar com essas características, como o proposto por Mein e Larson (1973).

Tabela 4. Resultados do modelo Green-Ampt para o evento de 180 mm/h.

t (min)	P (mm)	f (mm/h)	F (mm)	Q (mm)
0	0	180.0	3.00	0.00
1	3	180.0	3.00	0.00
2	6	173.3	5.94	0.11
3	9	149.7	8.64	0.50
4	12	138.4	11.04	0.69
5	15	131.4	13.29	0.81
6	18	126.7	15.44	0.89
7	21	123.2	17.52	0.95
8	24	120.6	19.55	0.99
9	27	118.4	21.54	1.03
10	30	116.7	23.50	1.05
11	33	115.2	25.44	1.08
12	36	114.0	27.35	1.10
13	39	112.9	29.24	1.12
14	42	112.0	31.11	1.13

6.4 Método de Philip

Para o modelo de Philip, os parâmetros encontrados de modo a retratar a taxa de infiltração observada foram: s = 13,4 mm/h$^{1/2}$ e A = 85,2 mm/h. O coeficiente de determinação foi praticamente igual ao do modelo de Horton 0,91. Os resultados encontrados considerando esses parâmetros são apresentados na Figura 8 e na Tabela 5.

Do ponto de vista dos parâmetros, o modelo apresentou resultado semelhante ao Green-Ampt para o coeficiente de escoamento (97,2 e 85,2 mm/h). No entanto, de modo similar ao de Horton, não apresentou um bom ajuste para o início da infiltração.

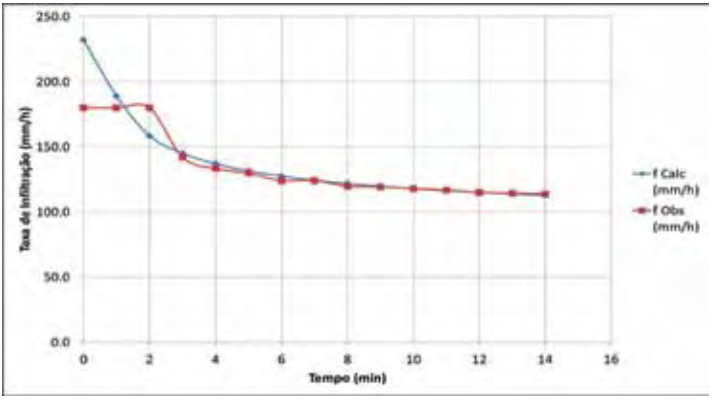


Figura 8. Taxa de infiltração calculada pelo modelo de Philip.

Esse problema que ocorre nos modelos de Horton e Philip pode ser resolvido utilizando-se modificações do modelo para comportar o problema, como as propostas Bauer (1974) e Peschke e Kutilek (1982).

Tabela 5. Resultados do modelo de Philip para o evento de 180 mm/h.

t (min)	P (mm)	f (mm/h)	F (mm)	Q (mm)
0.5	0	232.0	0.00	0.00
1	3	189.0	3.00	0.00
2	6	158.6	5.29	0.71
3	9	145.2	7.26	1.74
4	12	137.1	9.14	2.86
5	15	131.6	10.97	4.03
6	18	127.6	12.76	5.24
7	21	124.5	14.52	6.48
8	24	121.9	16.26	7.74
9	27	119.8	17.97	9.03
10	30	118.0	19.67	10.33
11	33	116.5	21.36	11.64
12	36	115.2	23.04	12.96
13	39	114.0	24.70	14.30
14	42	113.0	26.36	15.64

Referências bibliográficas

BAUER, S. W. (1974). A modified Horton equation during intermitent rainfall. Hydrological Sciences Bulletin, v. 19, n. 2, p. 219-224.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. (2003). Infiltração da água no solo, 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV. 98 p.

CASTRO, T. Q. (2011). Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis. Goiânia: UFG. 95 p. Mestrado (Dissertação em Engenharia do Meio Ambiente), , Universidade Federal de Goiás.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. (1911). Studies on soil physics, I. flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences. v. 4, p. 1-24.

HORTON, L. D. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society American Proceedings, Madison, 5, p. 399-417.

MEIN, R. G.; LARSON, T. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources. Research, v. 9, n. 2, p. 384-394.

MAIDMENT, D. (1993). Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill Professional. 1453 p.

PESCHKE, G; KUTILEK, M. (1982). Infiltration model in simulated hydrographs. Journal of Hydrology, v. 56, n. 3-4, p. 369-379.

PHILIP, J. R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Science, v. 83, n. 5, p. 345-357.

RIGHETTO, A. M. (1998). Hidrologia e recursos hídricos. São Carlos: Editora EESC/USP. 840 p.

SOIL CONSERVATION SERCIVE (1973). A method for estimating volume and rate of Runoff in small watersheds, TP-149. Washington (DC): Department of Agriculture. 64 p.

SINGH, V. P. (1989). Hydrologic systems: watershed modeling. Englewood Clifs (NJ): Prentice Hall. 420 p.

TODD, D. K.; MAYS. L. W. (2005). Groundwater hydrology. River Street (NJ): John Willey and Sons. 636 p.

TUCCI, C. E. M. (1998). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 952 p.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. (2000). Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 512 p.

Capítulo 7
Perfil de intemperismo e infiltração

Elza Conrado Jacintho
José Camapum de Carvalho
Fabrício Bueno da Fonseca Cardoso
Renato Cabral Guimarães

1 Introdução

Infiltração consiste na penetração da água da chuva no solo. Pode ocorrer de forma natural ou planejada. Nos sistemas de drenagem alternativos ou compensatórios, a água da chuva é retida e, em seguida, disponibilizada para o consumo ou infiltrada. Diversos fatores intervêm na infiltração da água da chuva no solo, dentre os quais podem ser citados: tipo e umidade do solo, cobertura vegetal, inclinação e forma do terreno e intensidade da chuva.

No presente capítulo serão estudadas a infiltração e as características do perfil de solo, que incluem o tipo de solo, a variação do índice de vazios, a umidade do solo e o nível do lençol freático. Para isso, serão apresentadas algumas contribuições de pesquisas realizadas por alunos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília que estudam propriedades e comportamentos de solos tropicais, sendo feita a associação dessas propriedades com a infiltração da água nos solos. Especial atenção será dada aos perfis de intemperismo de solos tropicais. Os resultados comentados referem-se a estudos realizados com solos do Distrito Federal, de Goiás e do Tocantins.

Cardoso (1995) estudou a dinâmica do colapso de solos do Distrito Federal de diferentes origens, mostrando, com base em análises químicas, mineralógicas e micromorfológicas, que os solos tropicais apresentavam colapsibilidade atrelada ao intemperismo por eles sofrido e não propriamente a sua origem.

Após a análise das várias proposições para a descrição de perfis de intemperismo, apresentadas na literatura, e com base em sua experiência com os solos lateríticos do Cerrado Brasileiro, Cardoso (2002) formulou uma nova proposta de descrição dos horizontes em perfis de solos lateríticos para uso nas áreas de geotecnia e geologia de engenharia. Essa proposta será abordada nos itens subsequentes, sendo comentados aspectos referentes à infiltração da água nos solos tropicais.

Também Guimarães (2002) se preocupou em caracterizar as propriedades do perfil do solo do Distrito Federal, fazendo um completo estudo do manto superficial de solo poroso colapsível que cobre boa parte da região central do Brasil. Em sua pesquisa, Guimarães (2002) apresentou, com base em resultados de ensaios de laboratório e de campo, a análise de um perfil de solo típico do Distrito Federal e seu desempenho como suporte de fundações profundas.

Nos estudos realizados por Cardoso (1995, 2002) e Guimarães (2002), nota-se a preocupação em caracterizar os perfis de intemperismo, avaliando-se aspectos como propriedades físico-químicas e estruturais e comportamentos como o relativo à colapsibilidade do solo em consequência da saturação. O conhecimento das características do perfil de solo é essencial na construção de estruturas de infiltração em regiões tropicais, pois tanto a capacidade de infiltração como os riscos geotécnicos oriundos da infiltração estão diretamente relacionados ao nível e ao processo de intemperismo pelo qual passou o solo.

Para se optar pela infiltração planejada, também denominada infiltração compensatória, deve-se pensar nos cuidados com a qualidade da água infiltrada, pois o nível de riscos de ordem geotécnica, como a perda de resistência (que induz ao fenômeno conhecido como colapso) e a erosão interna do solo encontram-se, muitas vezes, associadas às propriedades químicas do fluido de saturação e podem fazer com que a infiltração não seja tecnicamente viável.

2 Os solos tropicais

O Comitê de Solos Tropicais (Committee on Tropical Soils of International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering – ISSMFE), citado por Nogami e Villibor (1995), define solo tropical como aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais. Dentre os solos tropicais, destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

Em regiões tropicais, a grande maioria dos solos, em função das suas características físico-químicas originárias do processo de formação, apresenta alta porosidade e grande sensibilidade das ligações cimentícias em presença de água, sobretudo quando estas correspondem a pontes de argila (PAIXÃO e CAMAPUM DE CARVALHO, 1994). De forma geral, pode-se afirmar que a alta porosidade dos solos intemperizados apresenta-se como um aspecto favorável à infiltração de água nos solos. No entanto, a sensibilidade das ligações cimentícias pode apresentar-se como um aspecto desfavorável quanto à utilização de sistemas de drenagem alternativos. A atuação diferenciada do intemperismo aliada aos aspectos geológicos, entre outros fatores, faz com que as propriedades desses solos apresentem uma grande variabilidade, surgindo a necessidade de estudos regionalizados.

Nas regiões tropicais, são comuns as chuvas e as variações de temperatura. Ambas influenciam diretamente na infiltração da água no solo, pois promovem as variações do teor de umidade do solo e do nível do lençol freático.

Quanto à influência da umidade do solo na infiltração, Restrepo (2010) explica que, quando a água é aplicada em um solo seco, não há movimento descendente dessa água até que as partículas do solo estejam envolvidas por uma fina película d'água. As forças de atração molecular e capilar fazem com que a capacidade de infiltração inicial de um solo seco seja muito alta. À medida que a água percola, a camada superficial vai ficando semissaturada, fazendo com que as forças de capilaridade e/ou sucção diminuam. Com isso, diminui também a capacidade de infiltração, que tende a um valor constante após algumas horas. Outro fenômeno diz respeito à possibilidade de a infiltração de uma lâmina d'água contínua confinar a fase

ar, colocando-a sob pressão positiva e fazendo com que atue obstruindo o fluxo. Essa mesma pressão pode ainda atuar promovendo a desagregação do solo superficial ao atingir níveis que superam a coesão e a tensão efetiva do solo.

Parte dos solos encontrados no Distrito Federal possui uma camada de argila porosa colapsível que, de acordo com Cardoso *et al.* (1995), são solos profundamente intemperizados, formados por agregados de matriz fortemente argilosa, interligados por pontes de argila, apresentando elevados índices de vazios, com valores entre 1,0 e 4,0. Tais características do solo proporcionam grande facilidade de infiltração das águas de chuva e, consequentemente, alteração das propriedades mecânicas dos solos, devido à variação do grau de saturação e, por conseguinte, da sucção matricial (MORTARI e CAMAPUM DE CARVALHO, 1994).

Restrepo (2010), por meio de ensaios de infiltração em um furo de 10 cm de diâmetro e 2 m de profundidade, identificou como avança a frente de umedecimento no campo. A autora monitorou a umidade antes e depois de ensaios de infiltração em 39 furos a trado manual. Os resultados mostraram que a infiltração ocorre com mais intensidade na porção inferior do furo principal, apontando, assim, para a grande relevância de se preservar a infiltrabilidade na base das trincheiras e poços em solos porosos colapsíveis, tendo em vista a elevada permeabilidade vertical dos solos regionais. A maior ou menor capacidade de infiltração vertical está atrelada ao próprio processo de formação do solo e, portanto, pode mudar de um local para outro, mesmo dentro de uma única região, segundo as condições de formação do perfil de intemperismo, em especial a drenagem.

2.1 Perfis de intemperismo

Segundo Salomão e Antunes (1998), simplificadamente, pode-se afirmar que o desenvolvimento do solo inicia-se com o intemperismo, representado pelos fenômenos físicos e químicos que, agindo sobre a rocha, conduzem à formação de resíduos não consolidados que constituem o substrato pedogenético. Esse material, proveniente da desagregação e decomposição da rocha, poderá permanecer no local em que se desenvolveu, ou ser transportado para outro local.

Os perfis lateríticos mais conhecidos, quase sempre, apresentam uma zonalidade vertical possível de ser identificada no próprio campo, sendo nitidamente estruturados em horizontes. À medida que se transforma em solo, o material de origem vai se diferenciando em camadas mais ou menos paralelas à superfície, denominadas horizontes. A quantidade de horizontes e o nível de diferenciação depende do grau de evolução do perfil e também do tipo litológico da rocha-mãe (ALEVA, 1983; BÁRDOSSY e ALEVA, 1990; TARDY, 1993). Em todo caso, deve-se evitar, nos perfis de intemperismo tropicais, fazer associações diretas do comportamento hidráulico e mecânico com características como cor e textura obtidas táctil-visualmente sem que se proceda a análises complementares sobre a química, a mineralogia e a estrutura ou se avalie diretamente o comportamento por meio de ensaios.

Cardoso (2002), diante da grande variedade de horizontes encontrados na região do Distrito Federal, apresentou uma nova proposta de descrição dos horizontes em perfis de solos lateríticos, prevendo, inclusive, a existência do horizonte ferruginoso. Na realidade, a proposta é uma adaptação realizada a partir das descrições de perfis de Martins (2000), de

Pastore (1995) e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Apesar de ser baseada nos solos dos Cerrados, a descrição pode ser aplicada em perfis de solo laterítico de outras regiões, uma vez que mantém como preceito o desenvolvimento do perfil de acordo com o grau de intemperismo local, seguindo a proposta de Martins (2000), a qual, por sua vez, é uma adaptação de Walther (1915).

Desse modo, independentemente da rocha-mãe, o perfil de intemperismo pode ser completo ou truncado e apresentar as mais variadas espessuras dos horizontes, dependendo basicamente do intemperismo local. A Tabela 1 mostra um paralelo entre os horizontes das diferentes classificações de perfis lateríticos completos e a proposta de Cardoso (2002). As terminologias adotadas nessas classificações estão descritas em Cardoso (2002).

Tabela 1. Comparação entre os horizontes das diferentes classificações analisadas por Cardoso (2002).

Maiores subdivisões	**Cardoso (2002)**	**Martins (2000)**	**Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – EMBRAPA (1999)**	**Pastore (1995)**
Pedólito (0 a 30 m)	Horizonte O	Solum	Horizonte O	Solo
	Horizonte A		Horizonte A	orgânico
	Horizonte B		Horizonte B	Horizonte laterítico
	Cascalho laterítico	Cascalho laterítico	Horizonte B com caráter petroplíntico	? ? ?
	Couraça ferruginosa	Couraça ferruginosa	Horizonte B	
	Carapaça	Carapaça	litoplíntico ou similar a litoplíntico	
	Zona Mosqueada	Zona Mosqueada	Horizontes C plíntico ou similar a plíntico, ou glei com mosqueamentos ou similar a glei com mosqueamentos	
Saprólito (0 a 100 m)	Saprólito fino ou argiloso	Saprólito fino ou argiloso	Horizonte C glei sem mosqueamentos ou similar a glei sem mosqueamentos	Solo saprolítico
	Saprólito ou saprólito grosso	Saprólito grosso	Horizonte C	Saprólito
	Rocha muito alterada	ou arenoso	Horizonte R	Rocha muito alterada
	Rocha alterada	Saprock		Rocha alterada
Protólito	Rocha sã	Rocha-mãe		Rocha sã

O perfil de intemperismo completo da nova proposta apresenta 12 sub-horizontes agrupados em 7 horizontes (Tabela 1), em que são contempladas as características químicas, mineralógicas e geotécnicas originadas pelo intemperismo químico.

Os horizontes mais superficiais, nessa proposta, são divididos de acordo com a Classificação Morfogenética de Dokuchaev (1883). Dividem-se nos horizontes O, A e B, que fazem parte de uma terminologia de comum utilização entre os pedólogos. Deve-se salientar que se pode aqui inserir conceitos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos e de seus horizontes diagnósticos.

O horizonte ferruginoso, normalmente presente em solos tropicais, mostra os mesmos quatro sub-horizontes (cascalho laterítico, couraça ferruginosa, carapaça e zona mosqueada) apresentados em Martins (2000). Esses sub-horizontes representam todas as formas possíveis desse tipo de material encontrar-se na natureza. Em descrições de perfis para a geotecnia, a subdivisão torna-se importante, pois, na prática, as diferenças das estruturas e teores de oxi-hidróxidos de Fe e Al entre essas subdivisões geram, consequentemente, fortes diferenças entre os comportamentos mecânicos e hidráulicos.

Os horizontes mais profundos seguem as definições de Pastore (1995), as quais melhor caracterizam as possíveis diferenças do comportamento mecânico e hidráulico em materiais rochosos.

2.2 Mecanismos de alteração dos minerais

Em regiões tropicais, os minerais dos solos são resultantes da dinâmica química do alumínio, do ferro e da sílica dentro do processo de lateritização.

No trabalho de Buckman e Brady (1960), são apresentados os tipos fundamentais de alteração das rochas, a natureza e estabilidade dos minerais e as características mais importantes dos produtos obtidos. A Figura 1 apresenta a esquematização do processo de alteração em citação apresentada por Cardoso (2002).

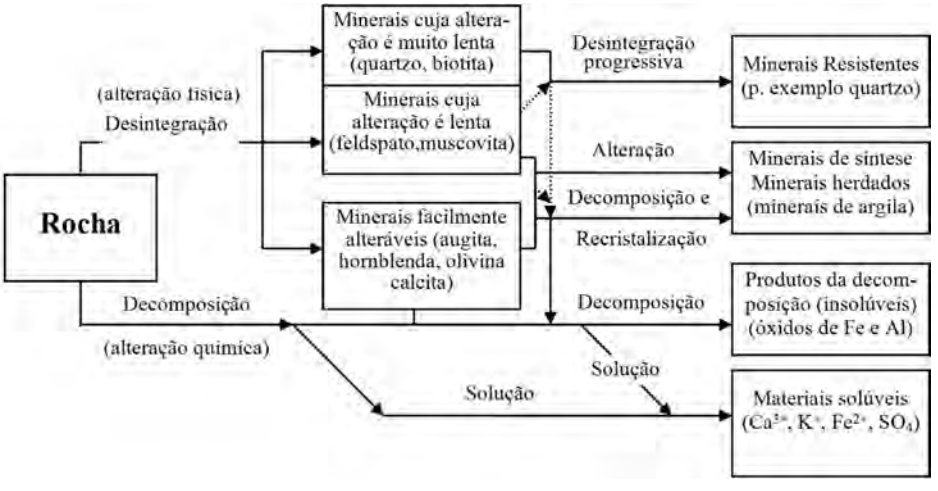


Figura 1. Tipos fundamentais de alteração das rochas (BUCKMAN e BRADY, 1960).

Millot (1964) descreve três mecanismos que originam os minerais de argila: herança, transformação e neoformação.

• **Herança** – consiste no mecanismo em que os minerais de argila herdados correspondem às argilas detríticas, originadas diretamente da rocha-mãe. Esses minerais são de mais usual ocorrência em solos derivados de rochas sedimentares, principalmente as pelíticas. Podem sofrer, por vezes, ligeira alteração durante a pedogênese, a qual pode consistir apenas numa diminuição das suas dimensões pela simples atuação mecânica.

• **Transformação** – consiste na transformação de filossilicatos, implicando uma transformação de fase cristalina em outra, essencialmente sólida. Um exemplo é a formação da ilita a partir da biotita (BESOAIN, 1985).

• **Neoformação** – consiste no mecanismo em que os minerais de argila formam-se por reações em fase líquida, seja por precipitação ou coprecipitação de geles ou soluções iônicas (FIELDES e SWINDALE, 1954).

A Figura 2, extraída de Buckman e Brady (1960), formula uma associação entre a composição química dos constituintes das rochas, certas condições da alteração química e os produtos obtidos. Segundo Brady (1989), a alteração dos minerais poderá ser estimulada por ação química, que abrange a remoção de alguns componentes solúveis e a substituição de outros, dentro do reticulado cristalográfico.

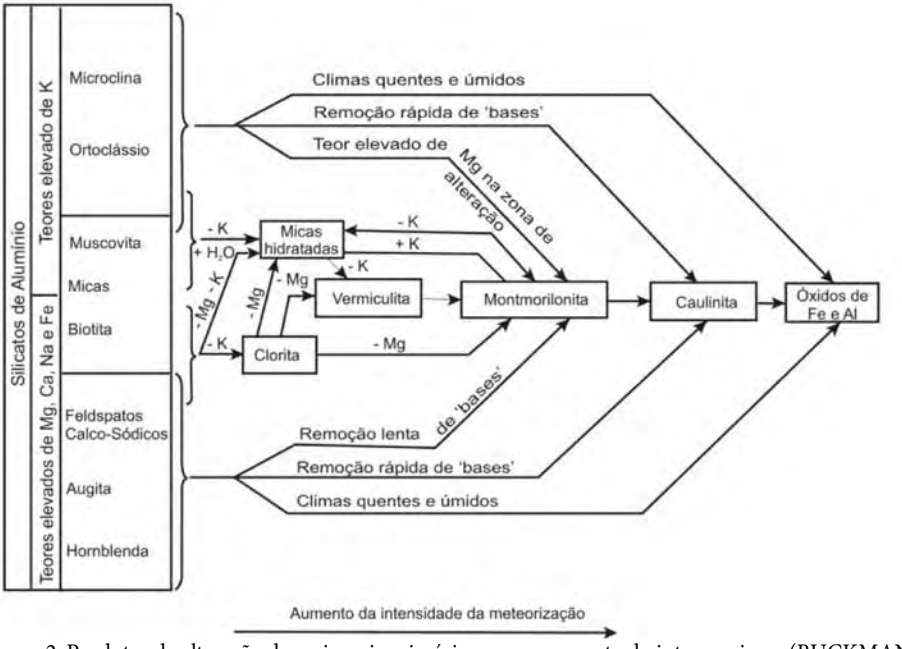


Figura 2. Produtos da alteração dos minerais primários com o aumento do intemperismo (BUCKMAN e BRADY, 1960).

3 Solos lateríticos

A lateritização é o processo pedogenético consequente do desenvolvimento de um pH superficial compreendido na faixa intermediária de aproximadamente 4,5 a 7,0, permitindo intensa lixiviação do silício na forma de $Si(OH)_4$ e das bases na forma de cátions dissolvidos,

enquanto ocorre a precipitação do alumínio e ferro férrico na forma de $M(OH)_3$, isto é, o enriquecimento relativo de Al e Fe nesses horizontes do solo sob a forma de óxidos. O ferro ferroso, tanto na forma do Fe^{2+} ou de $Fe(OH)_2$, é eliminado para condições de pH menor que 5,5. Sua permanência, sob a forma de $Fe(OH)_2$ precipitado, ocorrerá em condições ambientais não oxidantes e de pH mais elevado (CARVALHO, 1995a).

3.1 Aspectos químicos

Segundo Freire (2006), a composição química do solo depende da interação entre a composição da rocha que lhe deu origem com os demais fatores pedogênicos. Os fatores climáticos, bióticos, topográficos e o tempo influenciam bastante a composição química do solo, controlando a intemperização das rochas e dos minerais.

Costa (2004) descreve a matéria mineral do solo como sendo constituída principalmente por oxigênio, silício, alumínio e ferro. Na maior parte dos solos, os óxidos de silício e ferro somados constituem 90% ou mais de peso seco da fração inorgânica, dominando largamente o óxido de silício com 50 a 75%. Cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio, fósforo, manganês, enxofre, cloro e outros elementos, expressos em óxidos, constituem, em geral, menos de 10% do peso seco da fração mineral do solo. Fazem exceção os solos com elevada proporção de carbonato de cálcio.

Nas regiões tropicais, devido às mais altas temperatura e umidade, a degradação química é acelerada. Os tipos de reações que acarretam as alterações químicas no ambiente superficial são: hidratação-desidratação, oxidação-redução, dissolução-precipitação, carbonatação-descarbonatação, hidrólise e queluviação. Entre essas reações químicas, as principais identificadas nos solos brasileiros são a hidrólise e a queluviação (PEDRO, 1966).

O processo de hidrólise é a reação mais comum para os minerais silicatados e pode ser caracterizada por dois tipos: hidrólise total e hidrólise parcial. A hidrólise total ocorre quando toda a sílica e a base são eliminadas, enquanto o $Al(OH)_3$ se acumula, formando hidróxidos de alumínio do tipo gibbsita. Destaca-se que, além do alumínio, o ferro também permanece no perfil, uma vez que esses dois elementos apresentam comportamento geoquímico semelhante no domínio hidrolítico (TOLEDO *et al.*, 2000). O processo de eliminação total da sílica e formação de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio é denominado Alitização.

No caso da hidrólise parcial, ocorre a formação de silicatos de alumínio, e o processo é genericamente denominado de Sialitização (Toledo *et al.*, 2000). O processo se dá quando uma parte da sílica liberada do mineral reage com o alumínio, formando os argilo-minerais do tipo 1:1 (Monossialitização) ou de argilo-minerais do tipo 2:1 (Bissialitização), dependendo da eliminação dos cátions básicos.

A queluviação é o processo em que os elementos metálicos, de maneira especial o alumínio e o ferro-férrico, são móveis em relação à sílica que, nesse tipo de intemperismo, tende a se concentrar no perfil de alteração (CARVALHO, 1995a). O processo de queluviação pode ser por queluviação total e queluviação parcial. De acordo com Cardoso *et al.* (1998), na queluviação total ocorre a total saída de bases e de alumínio, em que o material residual será um produto silicoso. Já na queluviação parcial, além da permanência da sílica, existe a retenção parcial do alumínio e mesmo de algumas bases, formando argilo-minerais do tipo 2:1 ou do

grupo das esmectitas, e o processo é denominado de Aluminossialitização. Ainda segundo os mesmos autores, a alitização é o processo típico para a formação dos solos profundamente intemperizados não só do Distrito Federal, como também do Cerrado Brasileiro.

3.2 Aspectos mineralógicos

A lateritização, do ponto de vista mineralógico, é o ajuste da assembleia mineral de uma dada rocha-mãe às condições da superfície da Terra sob clima tropical (BÁRDOSSY e ALEVA, 1990).

A matéria mineral sólida do solo é constituída por minerais primários e por minerais resultantes da alteração destes, designados minerais secundários. A presença de cada um deles está associada ao nível de transformação intempérica sofrida pelo perfil a partir da rocha.

Os minerais secundários de ocorrência mais frequente são minerais de argila (silicatos de alumínio no estado cristalino), silicatos não cristalinos, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (em certos solos, também de manganês e de titânio).

Nos solos lateríticos, os minerais mais frequentes são aqueles pertencentes ao grupo da caulinita (caulinita e haloisita) e os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Como mineral primário, é frequente a presença do quartzo devido à sua difícil intemperização. No que se refere aos óxi-hidróxidos de ferro e alumínio presentes nos solos lateríticos, não se pode deixar de comentar sobre a expressiva influência que essas partículas exercem sobre o comportamento dos solos. Nogami e Villibor (1995) explicam que, apesar de possuírem elevada superfície específica e diminutas dimensões, os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio não são plásticos ou são muito pouco plásticos, não são expansivos, possuem capacidade de troca catiônica desprezível, nas condições de pH predominantes nos solos, e possuem excesso de cargas positivas.

Cabe salientar, no entanto, que Cardoso (2002) mostrou para os solos do Distrito Federal que a presença dos oxi-hidróxidos de ferro é responsável pela maior plasticidade dos solos regionais. Análises realizadas nos solos estudados por Cardoso (2002), a partir da extração de matéria orgânica e de oxi-hidróxidos de Fe cristalinos dispersos na matriz e de baixa cristalinidade (amorfos e paracristalinos), mostram que esses componentes são importantes agentes na agregação dos solos, ou seja, quanto maior a concentração de um dos componentes, maior é a formação de agregados nos solos. O autor explica que os oxi-hidróxidos de Fe cristalinos dispersos na matriz e de baixa cristalinidade incrementam a plasticidade, aumentando os limites de Atterberg (w_L e w_p) e diminuindo os índices de plasticidade (I_p). Isso ocorre devido às elevadas superfícies específicas dos minerais de baixa cristalinidade (de 400 a 700 m^2/g) e oxi-hidróxidos de Fe cristalinos (de 30 a 400 m^2/g) em relação aos minerais de argila dos solos da região, como, por exemplo, a caulinita (de 5 a 10 m^2/g).

Quanto ao mecanismo, os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, com maior superfície específica e cargas positivas de superfície, aderem à superfície das argilas que, por sua vez, possuem menor superfície específica e cargas negativas de superfície, limitando o contato da água com o mineral de argila, o que reduziria a plasticidade dos elementos minerais de argila. No entanto, como esses compostos tendem a assumir a forma esférica e possuem carga de superfície positiva, além de a água ser polar, amplia-se a área disponível para interação com a água, o que aumenta a plasticidade. Quanto ao poder agregador desses compostos, sendo eles

dotados de cargas positivas de superfície e as argilas de carga negativa, exceto nos seus bordos que possuem cargas positivas e área de contato bem menor, passam a atuar como ponte entre minerais de argila, proporcionando a sua agregação. Esse seria o mecanismo químico-mineralógico indutor do aumento de plasticidade e gerador da agregação do solo. Vislumbra-se ainda, quanto à plasticidade, que, do ponto de vista físico, vazios presentes no interior dos agregados e microagregados com volume tal que proporcione a presença de água livre atuam contribuindo para aumentar os limites de Atterberg. Nesse caso, o aumento da umidade do solo devido à presença da água nos vazios não proporciona o aumento diferenciado entre os limites de plasticidade e de liquidez, o que tende a deslocar os pontos na carta de plasticidade para uma posição abaixo da linha A. Cabe lembrar que, tanto no limite de plasticidade como no de liquidez, o solo encontra-se, teoricamente, em estado saturado, porque a desidratação oriunda da secagem prévia do solo torna difícil a saturação completa dos poros presentes nos agregados e microagregados quando do reumedecimento na fase de ensaio. No processo de desidratação, estando inicialmente saturado, o solo só perde a saturação, ou seja, só entra ar em seu interior quando atinge o limite de contração. Faz-se necessário entender que, nos solos mineralogicamente expansivos, a contração oriunda da variação da distância interplanar basal pode ainda se dar após a perda da saturação completa do solo. O mesmo pode se dar em misturas do solo com materiais que fluem, como é o caso do betume.

Jacintho (2010), ao realizar difrações de raios X em areias lateríticas provenientes do Aproveitamento Hidrelétrico de Peixe Angical (Município de Peixe, Tocantins), optou por realizar duas análises, de modo a melhor verificar a ação do intemperismo na mineralogia. Para isso, separou o solo em duas frações: solo retido na peneira nº 200 (0,074 mm) denominada amostra A e solo passado na peneira nº 200 (0,074 mm) denominado amostra B. A autora verificou que a mineralogia identificada tanto para a amostra A (material grosseiro), quanto para a B (material fino) foi a mesma, com predominância de quartzo, contendo ainda vermiculita e caulinita como minerais subordinados e ilita e gibbsita como minerais traço. Apesar de as duas frações (A e B) terem apresentado mesma mineralogia, por meio da análise dos difratogramas, a autora verificou que a amostra B (material fino) continha os picos dos argilominerais ilita, caulinita e gibbsita mais definidos, em relação à amostra A (material grosseiro), o que indica uma maior quantidade desses minerais na amostra passada na peneira nº 200. O material fino teria maior quantidade de argilominerais resultantes do processo de intemperismo.

3.3 Aspectos físicos

Na decomposição sob condições tropicais de altas temperaturas e precipitação de chuvas, os minerais de argila tendem a decompor-se em várias formas de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio de acordo com as condições de intemperismo. O teor de óxido de ferro livre e o estado dos complexos alumino-ferruginosos (grau de desidratação e/ou endurecimento), bem como a estrutura granular típica de alguns solos lateríticos, são responsáveis pelas diferenças no comportamento de engenharia desses solos em relação às expectativas da mecânica dos solos convencionais para solos de zona temperada (GIDIGASU, 1976). Destaca-se, porém, que o ferro, conforme mostrado por Cardoso (1995), apresenta-se no solo, muitas vezes, na forma de nódulo, fazendo com que, nesses casos, o comportamento seja semelhante aos dos

solos de regiões temperadas. Essa observação é importante, pois coloca em evidência o fato de que os comportamentos mecânico e hidráulico dos solos tropicais devem levar em conta, além da química e da mineralogia, o aspecto estrutural.

A seguir, destacam-se como características físicas dos solos tropicais oriundas diretamente da estrutura dos solos lateríticos e de grande importância para a área geotécnica.

• Os índices de vazios de solos lateríticos são normalmente maiores do que seriam se associados com a distribuição granulométrica. Eles são função do processo de intemperismo e não estão relacionados à história de tensões. Essas observações são importantes, pois implicam a limitação da validade de relações, como aquelas que associam o comportamento mecânico e hidráulico à textura e/ou a história de tensões.

• Os índices de vazios de solos lateríticos podem variar bastante ou serem semelhantes independentemente da rocha-mãe.

• A distribuição de poros, devido à formação de agregados nos solos lateríticos, é caracterizada pela presença marcante de macroporos (entre os agregados) e de microporos (no interior dos agregados) (vide Figura 3).

• A estabilidade dos agregados e dos cimentos que os une pode ser afetada diante das variações de umidade e de energia mecânica a eles impostas.

• Resistências mais baixas e compressibilidades mais altas podem ser verificadas em consequência da estrutura do solo e de sua pedogênese. Essas características foram claramente observadas por Dias (1994).

• Em consequência dos elevados índices de vazios e da presença de macroporosidade, as permeabilidades são normalmente mais altas do que aquelas associadas à distribuição granulométrica.

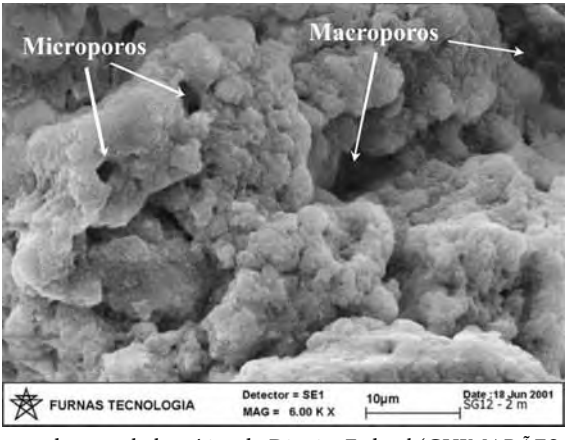


Figura 3. Microestrutura de um solo laterítico do Distrito Federal (GUIMARÃES, 2002).

3.3.1 Textura

A textura constitui um dos principais aspectos físicos que distinguem os solos tropicais lateríticos dos demais tipos de solo. Enquanto, nos demais tipos de solos, de um modo geral, é possível pensar na textura como a granulometria das partículas individualizadas dos mine-

rais (argilas, silte e areia), ou de um grupo de minerais solidamente ligados (seixo ou brita), nos solos lateríticos as partículas individualizadas, mesmo no caso das argilas, dificilmente se apresentam com propriedades e comportamentos que refletem a própria individualidade. Isso se deve à participação dos minerais de argila e mesmo dos minerais primários como o quartzo em grupamentos estruturais, os macro e microagregados (Figura 3), que apresentam características próprias, conferindo ao solo comportamentos distintos daqueles que refletiriam o do solo contendo as partículas individualizadas.

Os solos do Distrito Federal apresentam até mais de 50% de argila (ARAKI, 1997); no entanto, possuem permeabilidade de solos arenosos, porque a textura que atua definindo o comportamento é a do agregado e não a da partícula de argila individualizada. Assim, torna-se relevante fazer análises considerando o material defloculado e não defloculado. Guimarães (2002), ao realizar ensaios de granulometria com e sem defloculante, verificou que os resultados apresentavam grandes diferenças (Figuras 4). No ensaio sem defloculante, a parcela de argila forma microagregados areno-siltoso. A agregação da parcela argilosa foi verificada também para amostra de Goiânia estudada por Jacintho (2010), como mostra a Figura 5.

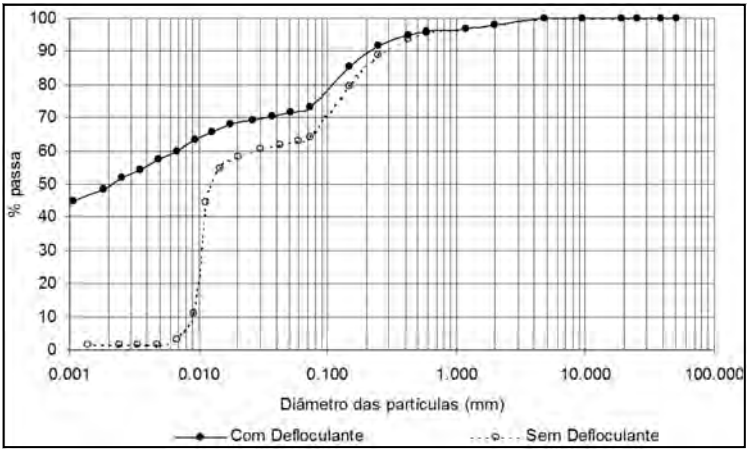


Figura 4. Curvas granulométricas com e sem defloculante, 6 m, Brasília, DF (GUIMARÃES, 2002).

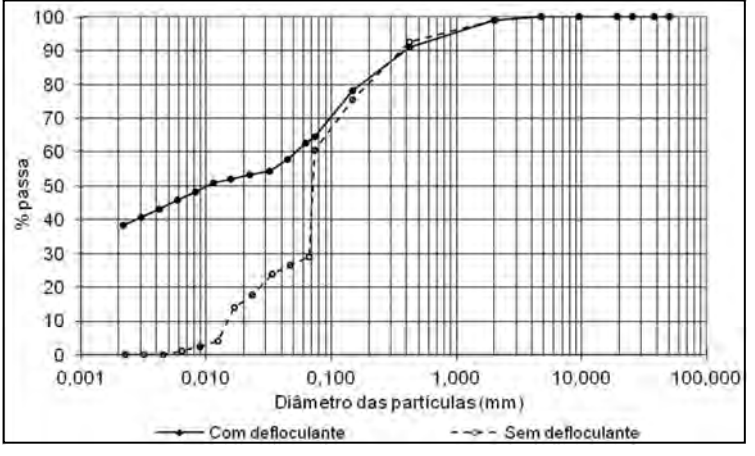


Figura 5. Curvas granulométricas com e sem defloculante, Goiânia, GO (JACINTHO, 2010).

A textura granular é conferida aos solos lateríticos por um processo pedogenético contínuo no qual os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio passam a atuar de modo mais ou menos intenso, interferindo diretamente na estabilidade estrutural dos agregados formados.

Levando-se em conta essa peculiaridade dos solos lateríticos, é fácil perceber a necessidade de a caracterização textural desses solos ser feita levando-se em conta não só a granulometria das partículas individualizadas, como também e principalmente a correspondente ao estado agregado, pois é ela que define em maior grau o comportamento do solo.

A textura dos solos lateríticos, ao interferir diretamente no comportamento do solo afetando parâmetros hidráulicos e mecânicos, assume grande importância no estudo da infiltração da água no solo. Ao mesmo tempo em que os vazios proporcionam a rápida penetração da água nos solos, a estabilidade estrutural das ligações pode ser afetada com o umedecimento decorrente do processo de infiltração.

Ainda no que tange à infiltração, essas observações sobre a textura assumem grande relevância, pois implicam a necessidade de se conhecer o comportamento hidráulico do solo a partir de ensaios específicos, como os de permeabilidade em laboratório e infiltração no campo. Estimativas com base na textura ou determinação indireta a partir de resultados de ensaios de adensamento oferecem valores irreais de permeabilidade, tendo em vista que ambos contemplam a porosidade global sem que se leve em conta a distribuição dos poros em macro e microporos nos solos lateríticos.

3.3.2 Plasticidade

Uma das mais importantes propriedades dos solos lateríticos é a plasticidade. Vários são os fatores que podem influenciar nos valores finais dos limites de liquidez e de plasticidade. Normalmente a natureza, a composição química, a mineralogia e o teor da fração fina são os principais fatores citados como aqueles que praticamente definem a plasticidade de um solo (QUEIROZ DE CARVALHO, 1986). Como já se sabe, independentemente da origem do solo (de região tropical ou temperada), os limites de plasticidade e liquidez aumentam à medida que aumentam os teores de argila no solo; no entanto, esses limites são afetados pela presença de agregações e de oxi-hidróxidos de ferro e/ou alumínio presentes nos solos tropicais.

Em solos formados em regiões tropicais, os principais constituintes argilo-minerais são os dos grupos da caulinita, ilita e montmorilonita. Os primeiros caracterizam os solos mais intemperizados e os últimos, os menos intemperizados. Dentre vários outros trabalhos, Baver *et al.* (1972) demonstram que a ilita possui os limites de plasticidade e liquidez, bem como o índice de plasticidade, superiores aos da caulinita, e ambos os argilo-minerais possuem esses valores bastante inferiores aos da montmorilonita.

Um fator também muito importante na plasticidade dos solos é o seu teor em oxi-hidróxidos de ferro. Queiroz de Carvalho (1986) formula duas hipóteses para explicar a influência dos oxi-hidróxidos na plasticidade, a seguir mencionadas.

• Se o ferro presente no solo ocorre associado às partículas finas, recobrindo-as ou mesmo cimentando-as, é de se esperar que a plasticidade seja afetada por uma redução nos valores dos limites de liquidez e de plasticidade (GIDIGASU, 1976). Assim, a extração do ferro

deve aumentar a plasticidade. Uma prova para este fato é apresentada por Newill (1961), que mostrou que a extração do ferro aumentou o limite de liquidez em até 93% para dois solos lateríticos do Quênia, ricos em meta-haloisita.

• Se, por outro lado, o ferro ocorre no solo como partículas discretas ou parcialmente discretas, é de se esperar que o mesmo não tenha efeito (ou se o tiver será em escala reduzida), sobre os valores dos limites de plasticidade e liquidez (QUEIROZ DE CARVALHO, 1979). No entanto, no estudo realizado por Cardoso (2002) para solos do Distrito Federal, verificou-se que a remoção dos oxi-hidróxidos de ferro reduziu a plasticidade dos solos estudados, ou seja, a presença desses compostos estava contribuindo para o aumento da plasticidade.

Outros fatores de grande importância na plasticidade de solos lateríticos são o amolgamento e a desidratação, os quais, segundo a literatura, mudam a plasticidade de duas formas, descritas a seguir.

• O revestimento das partículas do solo por oxi-hidróxidos de ferro reduz a capacidade dos minerais de argila em absorver água e pode fisicamente cimentar grãos adjacentes, produzindo, assim, agregados maiores. Ambos os fatores reduzem a plasticidade, mas o intenso amolgamento do solo destrói agregados e revestimentos de oxi-hidróxidos. Isso é importante quando relacionado com procedimentos de ensaios de laboratório para operações de construção. A destruição dos agregados de um solo fino em operações de escavação, transporte e disposição de materiais provavelmente não atinge a extensão já oriunda do amolgamento nos ensaios de plasticidade. A plasticidade do material de construção no campo pode, assim, ser mais baixa do que a obtida em laboratório (MENDOZA, 1985; IGNATIUS, 1988; *The Quarterly Journal of Engineering Geology Report*, 1990), considerando-se apenas o efeito do amolgamento, pois o processo de pré-secagem pelo qual passa o solo na fase de preparação de amostra teria efeito oposto. Muitas vezes, além do problema gerado pelo amolgamento, a constatação de menor plasticidade no campo se dá em função da menor quantidade de água necessária para a compactação *in situ*. No entanto, o contrário pode também ser observado com base em duas possibilidades complementares: a primeira é que, sendo rico em haloisita hidratada, a secagem do solo em laboratório, mesmo que ao ar, torna suas umidades correspondentes aos limites de Atterberg menores que a de campo onde este mineral mantém-se hidratado até a determinação da umidade, aparentando, se considerada a umidade ótima pré-definida em laboratório, que o solo requer mais água para a sua compactação; mas se eliminada a água de hidratação da haloisita, facilmente se chegaria a equivalência entre campo e laboratório. A segunda possibilidade diz respeito ao fato de que o reumedecimento do solo pré-desidratado em laboratório não possibilita a saturação dos microporos e mesoporos que compõem o agregado, pois o ar interior o impede e, com isso, obtém-se menor umidade. Já no campo, esses agregados ou microagregados encontram-se saturados, acarretando maior umidade determinada e dando a falsa aparência de que no campo o solo é mais plástico e requer maior umidade de compactação.

• Outra característica fundamental da plasticidade em solos lateríticos é a mudança irreversível no momento desidratação. Solos que contêm haloisita hidratada e hidróxidos de ferro e alumínio podem se tornar menos plásticos após secagem. Isso é, em parte, devido à desidratação dos hidróxidos que cria uma ligação mais forte entre as partículas e resiste à penetração da água e, em parte, devido à irreversibilidade da desidratação ocorrida em haloisitas hidratadas. Nesse último caso, a redução é apenas aparente, pois a diferença de

umidade se refere à perda de água da estrutura cristalina, não intervindo ou intervindo pouco na interação mineral-água externa, o que faz com que o índice de plasticidade varie pouco, apesar de variações significativas nos limites de liquidez e plasticidade. O efeito é observado durante a secagem ao ar, mas é mais evidente na secagem em estufa à alta temperatura (VARGAS, 1982; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 1985; QUEIROZ DE CARVALHO, 1985; *The Quarterly Journal of Engineering Geology Report*, 1990). Ignatius (1988), estudando vários aspectos relacionados à plasticidade em 17 solos de diferentes localidades do Brasil, constatou que as amostras que sofreram secagem em estufa produziram resultados referentes ao limite de liquidez menores que aqueles oriundos dos processos sem a secagem prévia e com a secagem prévia ao ar, sem, contudo, observar esse mesmo tipo de diferença entre os dois últimos processos. Esse fenômeno está, muitas vezes, associado ao fato de não se conseguir saturar os micro e mesoporos presentes no interior dos agregados e microagregados, quando, após dessaturação pelos processos de pré-secagem do solo, mesmo que ao ar, faz-se o seu reumedecimento para a realização dos ensaios de limites de Atterberg.

3.3.3 Densidade real dos grãos

A densidade real dos grãos é consequência dos tipos de componentes minerais e orgânicos e de suas proporções em um solo (Tabela 2). Ela depende também, conforme mostrado por Campos *et al.* (2008), do nível de hidratação estrutural do mineral quando se trata de minerais expansivos.

Tabela 2. Densidade real de alguns minerais constituintes de solos tropicais (KIEHL, 1979).

Mineral	Densidade Real	Mineral	Densidade Real
Caulinita	2,60 - 2,68	Goethita	4,37
Ilita	2,60 - 2,68	Hematita	4,90 - 5,30
Montmorilonita	2,20 - 2,70	Magnetita	5,18
Quartzo	2,65 - 2,66	Rutilo	4,18 - 4,25
Gibbsita	2,30 - 2,40	Zircão	4,68 - 4,70

Em regiões de clima frio, onde os solos têm baixos teores em oxi-hidróxidos de ferro, a densidade real está em torno de 2,65. Em regiões de clima tropical, são frequentes os solos com densidade real dos grãos próxima de 3,0 (KIEHL, 1979).

Towsend *et al.* (1971) mostram que a presença de oxi-hidróxidos de ferro em solos causa altos valores de densidade real dos grãos. Esses autores mostram que as densidades reais em amostras naturais de dois solos, com valores de 3,04 e 2,85, passam, após a extração dos oxi-hidróxidos de ferro, respectivamente, a 2,80 e 2,67.

A presença marcante de gibbisita em solos lateríticos conduz à diminuição da densidade real, sendo tal redução condicionada também pela maior ou menor presença de oxi-hidróxido de ferro.

Outro aspecto que afeta a densidade real dos solos lateríticos é a presença de poros isolados no interior dos agregados, pois os valores determinados não os levam em consideração.

A densidade real da matéria orgânica varia de 0,6 a 1,0. Nos solos tropicais ricos em matéria orgânica, a massa específica é sensivelmente diminuída, principalmente quando o teor de material húmico é superior a 3% (KIEHL, 1979). Destaca-se, no entanto, que, na maioria dos casos, os solos tropicais, principalmente os do cerrado brasileiro, são pobres em matéria orgânica, a qual se encontra mais concentrada na camada mais superficial.

4 Solos saprolíticos

Segundo o Comitê de Solos Tropicais da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (Committee on Tropical Soils of the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1985, citado por Pastore,1992), solo saprolítico é aquele que resulta da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha (considerada material consolidado da crosta terrestre), mantendo ainda, de maneira nítida, a estrutura (ou fábrica) da rocha que lhe deu origem. O solo saprolítico é um solo genuinamente residual.

Segundo Pastore (1992), as estruturas reliquiares, frequentes nos solos saprolíticos, compreendem todas as feições, tais como foliação, fraturas, juntas e falhas do maciço rochoso que ficaram preservadas no maciço de solo saprolítico, apesar da profunda alteração sofrida.

No perfil de intemperismo proposto por Pastore (1995), os horizontes de solo saprolítico e saprólito são diferenciados pelos aspectos descritos a seguir.

• O horizonte de solo saprolítico apresenta até 10% de blocos de rocha. A espessura e composição granulométrica desse horizonte são muito variáveis, dependendo da sua posição no relevo e das rochas de origem. As composições granulométricas mais comuns são as areias siltosas pouco argilosas e siltes argilosos pouco arenosos. Esse horizonte pode conter quartzo, argilas essencialmente cauliníticas e óxidos de ferro e alumínio hidratados, que formam agregados instáveis em estruturas porosas. As suas cores predominantes são as de tons avermelhados e amarelados (PASTORE, 1995).

• O horizonte de saprólito constitui-se na transição entre o maciço de solo e o maciço rochoso. É constituído, basicamente, por solo saprolítico e blocos de rocha de variadas dimensões com diversos graus de alteração. O solo tende a se desenvolver ao longo das descontinuidades remanescentes do maciço rochoso, através das quais há maior facilidade de percolação de água, e nas zonas formadas por rochas mais susceptíveis a alteração. No horizonte de saprólito, segundo Deere e Patton (1971), a quantidade de blocos é muito variável (de 10 a 95%), o que confere aos saprólitos um comportamento extremamente variado. A espessura desse horizonte é muito irregular, sendo comuns grandes variações, ou até a sua inexistência em certos trechos de um maciço (PASTORE, 1995).

Serão abordados, neste capítulo, aspectos químicos, mineralógicos e físicos relativos ao horizonte de solo saprolítico. Os solos saprolíticos são comuns nas camadas menos intemperizadas. Dadas as baixas permeabilidades desses materiais, a penetração da água ocorre lentamente, fazendo com que esses solos, boa parte das vezes, não sejam indicados para receberem água proveniente de estruturas de infiltração. No entanto, podem existir casos em que a infiltração da água proveniente dos sistemas de drenagem alternativa seja viável em solos saprolíticos, dada a grande heterogeneidade desses solos e a possibilidade de existência de descontinuidades que facilitem a penetração da água.

4.1 Aspectos químicos

Os solos saprolíticos são, geralmente, caracterizados por valores de pH mais próximos do neutro e, em relação aos solos lateríticos, por mais elevada capacidade de troca catiônica (CTC). Um exemplo da ordem de grandeza do pH desses solos é fornecido por Jacintho (2005) para o solo saprolítico do Aproveitamento Múltiplo de Manso, para o qual se obteve um pH em água igual a 6,4, enquanto o pH em KCl foi de 5,5.

Para os solos regionais, Cardoso (2002), ao estudar cinco solos saprolíticos finos, obteve valores de pH em água variando entre 4,05 e 4,45 e em KCl variando entre 4,70 e 4,80, valores estes inferiores aos obtidos para os solos lateríticos pelo mesmo autor.

Jacintho (2010), ao estudar um solo saprolítico proveniente da Usina Hidrelétrica de Corumbá I, observou que tal solo apresentou valores de pH em água e em KCl de 4,3 e 5,0, respectivamente. Esses valores são próximos aos encontrados por Cardoso (2002) para solos saprolíticos do Distrito Federal. O ΔpH ($\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H2O}$) para o solo natural apresentou valor positivo de 0,7, dada a presença de goethita e gibbsita em sua composição mineralógica, o que aponta, mesmo não se tratando de solo laterítico, para nível já acentuado de intemperização. Kiehl (1979) relaciona o ΔpH positivo com a presença de óxidos de ferro e alumínio.

Quanto aos valores de capacidade de troca catiônica, Cardoso (2002) apresenta para os mesmos solos saprolíticos finos do Distrito Federal valores que variam entre 1,34 e 3,00 $cmol_c/kg$. Esses valores não foram muito diferentes dos obtidos pelo mesmo autor para os solos lateríticos regionais.

4.2 Aspectos mineralógicos

Segundo Nogami e Villibor (1995), mineralogicamente, os solos saprolíticos apresentam a seguinte composição:

- fração areia – mineralogia complexa contendo vários minerais em diferentes graus de alteração, tais como feldspatos, micas, além do quartzo;
- fração silte – principalmente caulinita, mica e quartzo;
- fração argila – caulinita, haloisita, nontronita, vermiculita e atapulgita.

Vaughan (1990), citado por Pastore (1992), refere-se à caulinita, haloisita, atapulgita e esmectitas como componentes da fração fina dos solos residuais, e ao quartzo e feldspatos em vários graus de alteração como as frações mais grosseiras. Jacintho (2005), ao estudar solos saprolíticos provenientes do Aproveitamento Múltiplo de Manso, no Mato Grosso, encontrou os mesmos componentes na fração grossa e fina do solo estudado, quais sejam: quartzo, ilita, clorita e feldspatos.

Carvalho (1995b), ao estudar o perfil de intemperismo do solo de Brasília, verificou para a profundidade de 10 m (correspondente ao início do horizonte saprolítico) a presença de: caulinita, quartzo, hematita e ilita.

Segundo Pastore (1992), os tipos e a proporção entre os minerais presentes no solo são muito variáveis, pois dependem da composição inicial da rocha de origem e do intemperismo por ela sofrido. Por exemplo, em rochas em que as porcentagens de quartzo, feldspato e mica são próximas, poderá haver quantidades também próximas de quartzo, caulinita e mica no solo, ao passo que, em paleossomas migmatíticos, o mineral predominante será a biotita.

Guimarães (2002), ao estudar um perfil de intemperismo do solo do Distrito Federal, observou que, ao se atingir o horizonte de solo saprolítico, as agregações presentes nos solos lateríticos cedem espaço para aglomerações ou pacotes de argilominerais (Figura 6a e b), os quais possuem propriedades e comportamento distintos dos agregados lateríticos (Figura 6c e d).

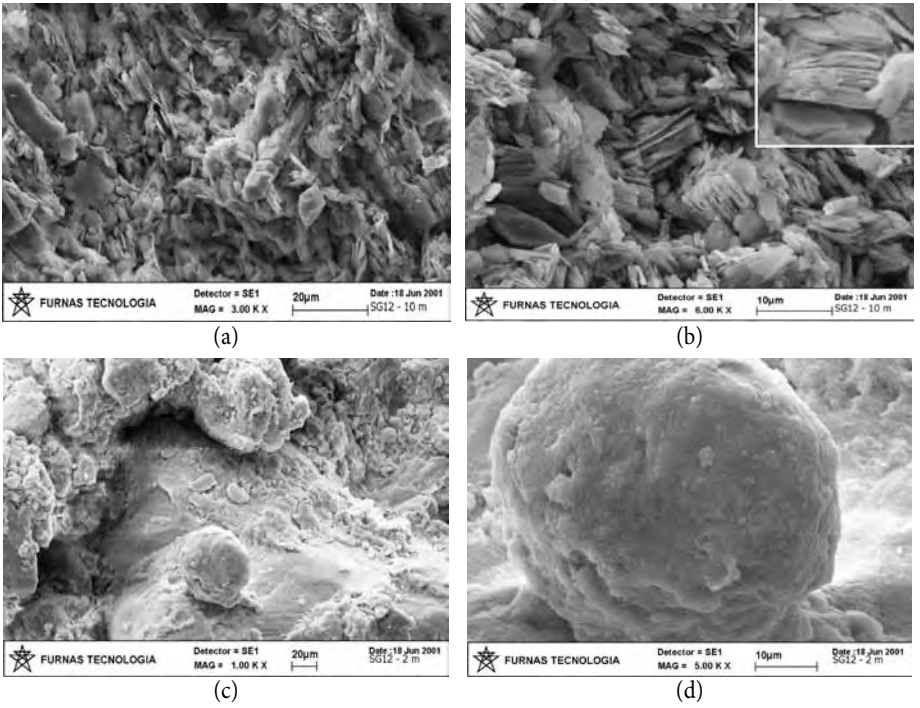


Figura 6. Microestrutura de solos do Distrito Federal: (a) e (b) solo saprolítico; (c) e (d) solo laterítico.

No solo saprolítico estudado por Jacintho (2010), mesmo após compactação, observou-se que as estruturas reliquiares permaneceram intactas, conforme mostrado na Figura 7. Foram identificados pacotes de argilominerais, típicos dos solos saprolíticos.

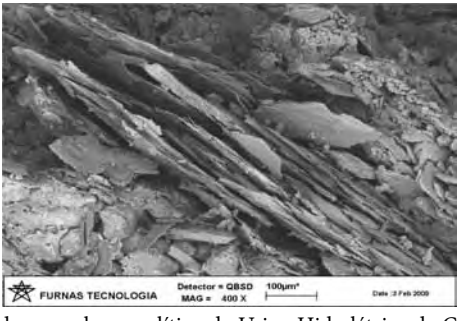


Figura 7. Microestrutura de um solo saprolítico da Usina Hidrelétrica de Corumbá I, Goiás (JACINTHO, 2010).

Em síntese, é preciso levar-se em conta a rocha de origem, os meios e condições de ataque que atuam no intemperismo e a forma com as partículas se arranjam para compor a

estrutura. Na cadeia evolutiva, tem-se no saprólito a predominância dos minerais primários que, por força do intemperismo, cedem espaço para os argilominerais 2:1 como as ilitas e as montmorilonitas que passam a caracterizar o solo saprolítico. Avançando na cadeia do intemperismo, a tendência é a transformação total dos minerais primários, exceto minerais resistentes (como o quartzo, que resiste ao intemperismo), em argilominerais 2:1; parte destes se transformam em argilominerais 1:1 (grupo das caulinitas). Finalmente, tem-se, no término da cadeia evolutiva, a presença de argilominerais do grupo da caulita e oxi-hidróxidos de alumínio que deste se originou. Nos perfis de intemperismo regionais, o quartzo e os oxi-hidróxidos de ferro se mantêm presentes.

É comum a presença de uma zona de transição entre o solo saprolítico e o solo laterítico. Essa zona de transição, devido à sua grande heterogeneidade de cor oriunda de diferenças químico-mineralógicas, é regionalmente conhecida como zona mosqueada. Destaca-se que essa transição é marcada por importantes dispersões em suas propriedades e comportamentos mecânico e hidráulico.

4.3 Aspectos físicos

A composição granulométrica, a plasticidade e a mineralogia dos solos saprolíticos estão intimamente relacionadas à textura e à composição químico-mineralógica das rochas de origem e ao intemperismo por elas sofrido.

4.3.1 Textura

Segundo Bourdeaux (1983), as maiores dificuldades encontradas para a caracterização dos solos saprolíticos estão diretamente associadas ao forte potencial evolutivo da composição granulométrica desses materiais quando manuseados, em face do caráter alterado dos fragmentos rochosos. Além da sensibilidade ao manuseio, no campo o fracionamento textural desses materiais pode também ocorrer devido a solicitações, aumento de umidade e ataque químico.

Pastore (1992), utilizando resultados de ensaios publicados na literatura, conclui que os solos saprolíticos derivados de rochas de granulação média a grossa, como muitos tipos de migmatitos, granitos e gnaisses, são compostos, predominantemente, por areias siltosas e siltes arenosos. Já os solos de granulação fina oriundos de rochas como basaltos e alguns tipos de granitóides são compostos, em sua maioria, por siltes argilosos e argilas siltosas. Ainda segundo o mesmo autor, considerando-se que as rochas apresentam granulação desde fina até grosseira, é de se esperar que a granulometria dos solos saprolíticos, delas derivados, seja muito variável.

Em trabalho realizado por Jacintho *et al.* (2006), são apresentadas considerações sobre um solo saprolítico proveniente do Aproveitamento Múltiplo de Manso. A Figura 8 apresenta a faixa de variação (valores máximos e mínimos) da granulometria do material destorroado (NBR 6457/1986) e não destorroado. Com auxílio dessa figura, é possível observar o potencial evolutivo desses solos. A granulometria do material, dependendo do nível de quebra, pode transitar de um extremo a outro nos gráficos da Figura 9, gerando grande variabilidade no comportamento do solo.

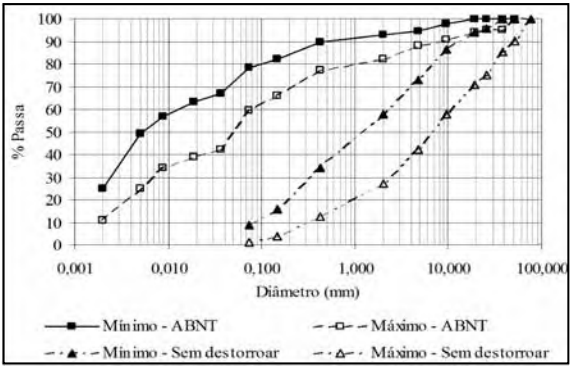


Figura 8. Curvas granulométricas máximas e mínimas destorroando e sem destorroar (JACINTHO *et al.*, 2006).

Observa-se, na Figura 9, que as curvas granulométricas obtidas com e sem o uso do defloculante hexametafosfato de sódio apresentaram resultados praticamente coincidentes. Esse fato indica que o solo apresenta, quanto ao aspecto químico, fácil defloculação, não sendo necessária a utilização do defloculante para desfazer pequenos grumos ou torrões.

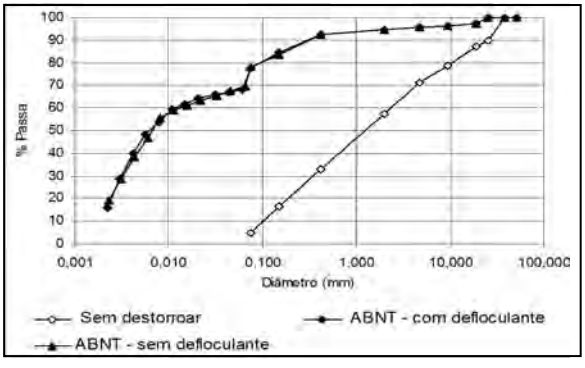


Figura 9. Granulometria ABNT com e sem defloculante e granulometria sem destorroar (JACINTHO *et al.*, 2006).

4.3.2 Plasticidade

Segundo Pastore (1992), a utilização de limites de consistência como ensaio-índice tem sido contestada por diversos autores, segundo os quais a grande dispersão de resultados está relacionada com a sensibilidade que esses solos apresentam ao serem manuseados. Essa é uma observação que evidentemente não pode ser generalizada, embora seja passível de ocorrer.

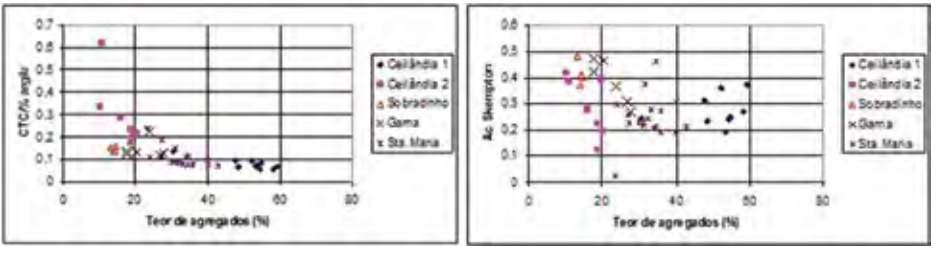
Os resultados apresentados por Jacintho (2003) na Tabela 3 mostram que, embora o destorroamento preconizado pela metodologia da ABNT na fase de preparação de amostra tenda a aumentar ligeiramente os limites de liquidez e plasticidade do solo, o índice de plasticidade tende a manter-se inalterado. Talvez a causa de dispersão seja de origem metodológica ou de heterogeneidade do próprio solo. Ao se adotar a metodologia de preparação de amostras re-

comendada pela ABNT, a qual envolve pré-secagem, os solos saprolíticos contendo argilominerais 2:1 necessitam que se faça o pré-umedecimento do material pelo menos 24 horas antes da realização do ensaio. Portanto, o problema não está, muitas vezes, no ensaio em si, mas sim em detalhes metodológicos que o extrapolam. Ao mesmo tempo, a presença em maior ou menor quantidade de oxi-hidróxidos de ferro interfere diretamente nos resultados dos limites de Atterberg, conforme mostrado por Cardoso (2002). Logo, querer fazer correlações com esses solos é sempre tarefa árdua e não necessariamente um problema desse ou daquele ensaio.

Tabela 3. Resultados de limites de consistência – ABNT e sem destorroamento (JACINTHO, 2003).

Local	Amostra	Ensaio ABNT			Ensaio sem destorroamento		
		w_L (%)	w_P (%)	IP (%)	w_L (%)	w_P (%)	IP (%)
Barragem do leito do rio	1	48	29	19	46	27	19
	2	51	30	21	49	28	21
	3	36	20	16	36	22	14
Barragem da margem esquerda	1	41	24	17	40	24	16
Barragem da margem direita	1	47	26	21	47	26	21

O exame das fotografias de microscopias de varredura de solos saprolíticos tem revelado que, frequentemente, a fração silte desses solos contém macrocristais de caulinita (geralmente associados à haloisita) e de mica, que imprime comportamentos peculiares ao solo. Assim, siltes desses minerais, sem fração argila, podem apresentar plasticidade, o que torna discutível a validade das leis que regem a atividade coloidal, segundo conceituação de Skempton (COZZOLINO e NOGAMI, 1993). Ao se trabalhar com solos tropicais de um modo geral, é recomendável, na avaliação da atividade da fração argila, que também se determine o coeficiente de atividade a partir da relação entre a capacidade de troca catiônica e a fração argila (EMBRAPA, 1999). A avaliação tem por vantagem colocar de lado aspectos como a agregação que interfere diretamente na plasticidade. A Figura 10 mostra, a partir dos resultados obtidos por Lima (2003), que a relação entre o teor de agregados e o coeficiente de atividade obtida segundo a proposta da EMBRAPA (1999) (Figura 10a) é melhor do que a relação obtida segundo a proposta formulada por Skempton (1953) para avaliação da atividade do solo (Figura 10b).



(a) (b)

Figura 10. Relação entre o teor de agregados e o coeficiente de atividade calculado segundo: a) EMBRAPA (1999); b) Skempton (1953).

Um aspecto interessante colocado em evidência por Jacintho (2003) é a constatação de que o limite de liquidez em amostras não destorroadas aumenta com o peso específico dos sólidos, embora esse parâmetro tenha apresentado pequena variação. Essa verificação mostra que as propriedades plásticas do solo estudado estão mais relacionadas à natureza químico-mineralógica do que propriamente à textura, pois o peso específico dos sólidos depende da mineralogia.

4.3.3 Densidade real dos grãos

A Tabela 4 mostra os resultados de densidade real dos grãos (Gs) obtidas para solos saprolíticos usados em barragens brasileiras. Observa-se que os valores obtidos variam bastante de local para local, pois dependem da mineralogia, a qual, por sua vez, é função do tipo de rocha e da intemperização por ela sofrida ao longo do tempo. Portanto, não é possível associar diretamente a densidade real dos grãos à infiltrabilidade dos solos, pois esta depende em maior grau de fatores como a porosidade e a própria distribuição dos poros. Conforme mostram os resultados apresentados por Jacintho (2003), a densidade real dos grãos depende da mineralogia, e esta, por sua vez, interfere diretamente em parâmetros como a plasticidade e a coesão. Tem-se, portanto, que a densidade real dos grãos termina por influenciar a infiltração da água no solo. Essa relação pode ser explorada de modo mais eficiente para o caso de um perfil de intemperismo ou para uma microrregião.

Tabela 4. Densidade real dos grãos de alguns solos de barragens brasileiras.

Local	Rocha de origem	Gs	Referência
Nova Avanhandava	Basalto	2,93	Cruz (1996)
Tucuruí	Basalto	2,90	Cruz (1996)
Tucuruí	Diabásio	3,06	Cruz (1996)
Tucuruí	Metabásio	2,88	Cruz (1996)
Tucuruí	Filito	2,81	Cruz (1996)
AHE Capivara	Basalto	2,86	Cruz *et al.* (1975)
UHE Salto Santiago	Basalto	2,93	Sardinha *et al.* (1981)
UHE Euclides da Cunha	Gnaisse	2,75	Bourdeaux (1983)
AHE Corumbá I	Micaxisto	2,85	Caproni Júnior *et al.* (1994)
APM Manso	Metassiltito / Metarenito	2,71	Jacintho (2005)

Na avaliação da porosidade de solos pouco intemperizados como os saprolíticos e os saprólitos, objetivando a análise de infiltrabilidade, faz-se necessário que se leve em conta, quando há presença de argilominerais expansivos, o nível de hidratação dos solos, o qual afeta diretamente a densidade real. Destaca-se, ainda, que as variações volumétricas oriundas do umedecimento e da secagem desses solos não impactam diretamente a infiltrabilidade, pois elas correspondem às variações do volume de vazios e da distância interplanar basal, conforme apontado por Campos *et al.* (2008).

5 Considerações finais

Este capítulo, ao apresentar uma análise detalhada dos solos que compõem o perfil de intemperismo em regiões tropicais, mostra que, por um lado, os solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, são químico-mineralogicamente mais estáveis e apresentam maior permeabilidade; por outro, devido principalmente à sua elevada porosidade, os solos são estruturalmente metaestáveis e mais susceptíveis de apresentarem problemas como erosão interna e colapso estrutural quando ocorre infiltração concentrada em maior escala. Tem-se, assim, que os sistemas de infiltração a serem implantados nesses solos requerem análises mais detalhadas quanto aos seus efeitos de curto e longo prazo.

Já os solos saprolíticos e os saprólitos, apesar de muitas vezes serem dotados de estruturas menos porosas e mais estáveis frente ao aumento de umidade, exceto o caso de solos estruturalmente e/ou mineralogicamente expansivos, apresentam-se menos porosos e, por consequência, menos favoráveis à infiltração. Quando, porém, opta-se por instalar sistemas de infiltração nesses solos, é necessário avaliar-se o impacto do aumento de umidade em fenômenos como o da expansão.

No perfil de intemperismo como um todo, é sempre relevante atentar para a influência da química do fluido de infiltração em relação ao comportamento hidráulico e mecânico do solo.

Referências bibliográficas

ALEVA, G. J. J. (1983). On weathering and denudation of humid tropical interfluves and their triple planation surfaces. Geol. Mij., v. 62, p. 383-388.

ARAKI, M. S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal. Brasília, DF: UnB. 113 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, G.DM-040A/97.

BÁRDOSSY, G.; ALEVA, G. J. J. (1990). Lateritic bauxites. Developments in Economic Geology, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, v. 27, 624 p.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. (1972). Soil Physics. 4th ed., New York, USA: John Wiley & Sons Inc. 489 p.

BESOAIN, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura (IICA). Serie de Libros y Materiales Educativos, San José, Costa Rica, n. 60, 1205 p.

BOURDEAUX, G. H. R. M. (1983). Materiais e métodos não-convencionais em barragens de terra e de enrocamento. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (CBGB), 15, nov. 1983, Rio de Janeiro, RJ. Rio de Janeiro, RJ: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. v. 3, p. 325-500.

BRADY, N. C. (1989). Natureza e propriedades dos solos. Rio de Janeiro, RJ: Ed. Freitas Bastos. 878 p.

BUCKMAN, H. O; BRADY, N. C. (1960). The nature and properties of soils. New York, USA: The MacMillan Company. 567 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CRISPEL, J. J.; QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. (1985). Influence de la temperature de sechage sur les proprietes chimiques, physiques et mecaniques de quelques sols lateritiques du Nord et du Nord-Est du Brésil. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC SOILS, 1, feb. 1985, Brasília, DF. Brasília, DF: Brazilian Society for Soil Mechanics. v. 1, p. 51-62.

CAMPOS, I. C. O.; GUIMARÃES, E. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 23 a 26 ago. 2008, Búzios, RJ. Búzios, RJ: ABMS. CD-ROM, p. 1535-1542.

CARDOSO, F. B. F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso. Brasília, DF: UnB. 140 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM-026A/95.

CARDOSO, F. B. F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Brasília, DF: UnB. 357 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-009A/02.

CARDOSO, F. B. C.; MARTINS, E. S.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1998). A evolução pedogeoquímica e sua influência nas propriedades físicas dos solos profundamente intemperizados do Distrito Federal. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11, 5 a 10 nov. 1998, Brasília, DF. Brasília, DF: ABMS. p. 51-58.

CARDOSO, F. B. F.; MARTINS, E. S.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1995). Micromorphological evolution of collapse in deeply weathered tropical soils. *In:* PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10, 29 oct. a 3 nov. 1995, Guadalajara, México. Guadalajara, México: SMMS. v. 1, p. 57-65.

CARVALHO, I. G. (1995a). Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos. Salvador, BA: Bureau Gráfica e Editora. 239 p.

CARVALHO, M. N. (1995b). Seminário sobre argilominerais apresentado na disciplina "Geotecnia de Solos Tropicais". Universidade de Brasília, Brasília, DF. 5 p., notas de aula.

COSTA, J. B. (2004). Caracterização e constituição do solo. 7. ed. Lisboa, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian. 527 p.

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. (1993). Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. Solos e Rochas. Revista Brasileira de Geotecnia, ABMS/ABGE. v. 16, n. 2, p. 77-91.

DIAS, R. D. (1994). Pedogenesis and its relationship to lateritic compressibility and collapsibility. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 13, 4 a 10 jan. 1994, New Delhi, Inde. New Delhi, Inde: ISSMFE. v. 4, p. 1489-1492.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. (1971). Slope stability in residual soils. PACSMFE, Puerto Rico, v.1, n. 4, p. 87-170.

DOKUCHAEV, V.V. (1883). Basic soil science for agricultural. Cap. 1. Vil`Yams, V.R., Weathering of rocks and differentation of the properties of soil-forming rocks. Translated from russian. Washington, D.C, USA. p. 25-42.

EMBRAPA (1999). Sistema brasileiro de classificação de solos. EMBRAPA – Solos (Rio de Janeiro). Brasília, DF. 412 p.

FIELDES, M.; SWINDALE, L. D. (1954). Chemical weathering of silicates in soil formation. J. Scie. Techn., v. 36, p. 141-154.

FREIRE, O. (2006). Solos das regiões tropicais. Botucatu, SP: Fepaf. 271 p.

GIDIGASU, M. D. (1976). Laterite soil engineering, pedogenesis and engineering principles. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Sci. Publ. Co. 570 p.

GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Brasília: UnB. 183 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM – 090A/02.

IGNATIUS, S. G. (1988). Uso dos limites de Atterberg e da análise granulométrica na identificação e classificação de solos tropicais para fins de engenharia civil. São Paulo, SP: USP. 309 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

JACINTHO, E. C. (2003). Seminário sobre "Estudo de solos residuais compactados para construção de barragens" apresentado na disciplina "Geotecnia de solos tropicais". Universidade de Brasília. Brasília, DF, 27 p., notas de aula.

JACINTHO, E. C. (2005). Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens. Brasília, DF: UnB. 160 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM-132/05.

JACINTHO, E. C.; GUIMARÃES, R. C.; FLEURY, S. V.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2006). A influência do processo de preparação na compactação de um solo saprolítico. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13, 27 a 31 ago. 2006, Curitiba, PR. Curitiba, PR: ABMS. 6 p.

JACINTHO, E. C. (2010). Estudo de propriedades e comportamento de misturas solo-emulsão aplicado a barragens. Brasília, DF: UnB. 279 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-063/10.

KIEHL, E. J. (1979). Manual de edafologia: relações solo – planta. São Paulo, SP: Editora Agronômica CERES. 262 p.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília, DF: UnB. 336 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-17A/03.

MARTINS, E. S. (2000). Petrografia, mineralogia e geomorfologia de rególitos lateríticos do Distrito Federal. Brasília, DF: UnB. 196 p. Tese (Doutorado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

MENDOZA, M. J. (1985). Remolding and drying effects upon plasticity limits of residuals soils. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC SOILS, 1, feb. 1985, Brasília, DF. Brasília, DF: Brazilian Society for Soil Mechanics. v. 1, p. 145-156.

MILLOT, G. (1964). Géologie des argiles. Paris, France: Masson. 499 p.

MORTARI, D.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1994). Influência do perfil de umidade na instabilidade de encostas de boçorocas no Distrito Federal. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 10, ago. 1994, Foz do Iguaçu, PR. São Paulo, SP: ABMS. v. 4, p. 882-888.

NEWILL, D. (1961). A laboratory investigation of two red clays from Kenya. Géotechnique, v. 11, p. 302-318.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo, SP: Villibor. 213 p.

PAIXÃO, M. M. O. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1994). Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. *In:* SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 2, 4 e 5 abr. 1994, Recife, PE. Recife, PE: UFPe. v. 1, p.105-110.

PASTORE, E. L. (1992). Maciços de solos saprolíticos como fundação de barragens de concreto gravidade. São Carlos, SP: USP. 290 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

PASTORE, E. L. (1995). Weathering profiles. *In:* PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10, 29 oct. a 3 nov. 1995, Guadalajara, México. Guadalajara, México: SMMS. v. 1, p. 353-364.

PEDRO, G. (1966). Essai sur la caractérisation géochimique des diférent processus zonaux résultant de l`alteration superficielle. C.R.Ac. Sci., Paris, France, v. 262(D), p. 1828-1831.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. (1979). Soil properties affecting the lime stabilization of red tropical soils from North East Brazil. PhD Thesis, University of Leeds, England, 344 p.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. (1985). Study of the plasticity of lateritic soils: methodology and effect of drying on liquid and plastic limits. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC SOILS, 1, feb. 1985, Brasília, DF. Brasília, DF: Brazilian Society for Soil Mechanics. v. 1, p. 63-66.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. (1986). Efeito do teor de ferro na plasticidade de solos lateríticos. *In:* REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21, 1986, Salvador, BA. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Pavimentação. v. 1, p. 265-275.

RESTREPO, J. M. S. (2010). Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Brasília, DF: UnB. 183 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. DF. G.DM - 188/10.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. (1998). Solos em Pedologia. *In:* OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds). Geologia de Engenharia. São Paulo, SP: ABGE. p. 87-99.

SKEMPTON, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3, 1953, Zurich, Switzerland. Zurich, Switzerland. v. I, p. 57.

TARDY, Y. (1993). Pétrologie des latérites et dês sols tropicaux. Paris, France: Masson. 459 p.

THE QUARTERLY JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY (1990). Tropical residual soils – Geological Society Engineering Working Party Report, Reino Unido, v. 23, 101 p.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. (2000). Intemperismo e formação do solo. *In:* TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Org.). Decifrando a Terra. São Paulo, SP: Oficina de Textos. p. 140-166.

TOWSEND, F. C.; MANKE, P. G.; PARCHER, J. V. (1971). The influence of sesquioxides on lateritic soil properties. Highway Research Record, v. 374, p. 80-92.

VARGAS, M. (1982). O uso dos limites de Atterberg na classificação dos solos tropicais. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7, set. 1982, Olinda/Recife, PE. Olinda/Recife, PE: ABMS. v. 5, p. 262-278.

WALTHER, J. (1915). Laterite in West-Australien. Zeitsc. geol. Ges. Monatsber, v. 67, p. 113-140.

Capítulo 8
Qualidade da água e suas relações com a infiltração no solo

Ricardo Silveira Bernardes
Lenora Nunes Ludolf Gomes

1 Introdução

Ao abordar a qualidade da água no processo de infiltração no solo, procura-se dar ferramentas para que o leitor pudesse compreender, no conjunto de conhecimentos relacionados com a qualidade da água, os fundamentos que expliquem a dinâmica da qualidade da água ao longo da sua trajetória na matriz do solo. Para tanto, inicia-se com a apresentação dos principais aspectos da qualidade em ambientes naturais, quais sejam, as propriedades físicas, as propriedades químicas e as características biológicas. A partir disso, são apresentadas as principais características das águas em aquíferos subterrâneos (Tabela 1) e também é apresentado o impacto das ações humanas na qualidade da água.

A infiltração é um processo que envolve a passagem da água pelo solo, e este é mais que uma matriz mineral. O solo pode ser considerado um ecossistema bem estabelecido, onde os organismos presentes têm papel fundamenta na modificação da qualidade da água que ali percola. Para tanto, pressupõe-se que o solo serve de abrigo para diversos ciclos biológicos naturais com capacidade efetiva de modificar a qualidade da água.

Também são apresentados os principais usos da infiltração como processo tecnológico. Nessa etapa, pretende-se alertar sobre aspectos positivos e negativos da infiltração de água no solo.

Com esse conjunto de informações, acredita-se que o leitor terá material para julgar com mais critérios os processos de infiltração. Será o ponto de partida para aprofundar sua compreensão sobre os principais mecanismos envolvidos na transformação da qualidade da água.

2 Qualidade da água

A importância da água para o nosso planeta é tão grande, que existem defensores de que nosso planeta, ao invés de Terra, deveria ser denominado Água. De fato, ao analisarmos o desenvolvimento da vida na Terra, podemos constatar que a vida, tal como a conhecemos, só foi possível a partir da presença da água, o que moldou efetivamente os organismos que deram origem à diversidade biológica que temos hoje.

A água, com suas características físicas e químicas, foi também fator importante na estruturação da superfície terrestre na forma como a vemos hoje. Sua característica de estar associada a um ciclo constante fez com que fenômenos de fragmentação, dissolução, erosão

e transporte fossem construindo, lenta mas permanentemente, diversos ambientes. Não cabe aqui discorrer sobre todas as características importantes da água para a construção do nosso planeta, mas vale a pena apontar duas delas.

Tabela 1. Definição de algumas das propriedades da água no ambiente natural.

Parâmetro	Conceito
Calor específico	É a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C a temperatura de um grama de determinada substância. O elevado calor específico da água faz com que a amplitude de variação de sua temperatura seja baixa, mantendo-se uma temperatura relativamente estável mesmo frente às variações das temperaturas atmosféricas.
Tensão superficial	A movimentação das pontes de hidrogênio (formação e rompimento) confere à água uma estrutura dinâmica. Desta forma, a superfície da água em contato com o ar forma uma película de relativa resistência, o que permite que organismos pequenos se mantenham nessa interface água-ar atmosférico.
Cor	Reflete a presença de substâncias dispersas na água, dissolvidas ou finamente particuladas (tamanho menor que 1 μm), de origem orgânica (por exemplo, substâncias húmicas) ou inorgânica (por exemplo, ferro e manganês).
Turbidez	Representa a concentração de partículas em suspensão encontradas na água. Essa concentração tem influência direta na capacidade de transmissão e/ou penetração de luz na massa d'água.
Salinidade	Representa a presença de sais dissolvidos e seu grau de variação está fortemente associado aos constituintes minerais do solo, às taxas de evaporação e ao contato com águas oceânicas.
pH	Indica a concentração de íons hidrogênio na água (potencial hidrogeniônico). Dessa forma, infere sobre o grau das condições ácidas ou alcalinas presentes, interferindo, assim, na solubilidade de diferentes substâncias.

A primeira é a relação existente entre a pressão, a temperatura e a massa específica da água. Essa característica é importante porque os fluidos apresentam variação de sua massa específica em função da pressão e temperatura. Ao contrário de boa parte dos fluidos, a água tem uma superfície de estado que apresenta descontinuidade. Com isso, próximo do ponto de congelamento, a água apresenta um decréscimo de sua massa específica, tendo como resultado a flutuação do gelo sobre a água. Isso possibilita a formação de uma camada efetiva de isolamento térmico, permitindo que a vida continue ativa abaixo do gelo. Ao longo do desenvolvimento da vida na Terra, essa característica foi muito importante. Também essa expansão do volume ao se congelar tem papel importante na desagregação de rochas e na gênese dos solos.

A segunda característica é sua capacidade de agir como "solvente universal", o que a torna eficaz para dissolução e transporte de diversos componentes químicos. Essa característica deve ser analisada com bastante cuidado, pois a capacidade da água de infiltrar-se nas mais diversas estruturas no nosso planeta a torna um agente importante de dissolução de rochas e de transporte de elementos químicos para ambientes onde esses elementos não estavam presentes.

Diante disso, podemos afirmar que a água como composto químico formado unicamente por hidrogênio e oxigênio é praticamente inexistente nos ambientes naturais. Mesmo a água da chuva, formada pelo vapor que compõe as nuvens, ao precipitar já carrega diversos elementos químicos presentes na atmosfera, fazendo com que a água que chega ao solo possa ser vista como uma solução com diversos elementos como soluto.

Como resultado das principais características da água, pode-se afirmar que o que chamamos de "água" na natureza são diversas soluções aquosas, cada qual em harmonia com o ambiente onde se encontra e com estreita relação com os organismos vivos presentes. Entretanto, vale desenvolver algum esforço no sentido de apresentar algumas características mais gerais que podem dar uma ideia da água no seu sentido mais amplo.

2.1 Propriedades físicas da água no ambiente natural

No grupo de propriedades físicas da água, podemos listar temperatura, tensão superficial, cor e turbidez como aquelas que têm maiores repercussões para os organismos presentes na água.

O calor específico da água faz com que a massa de água aja como um elemento regulador da temperatura no ambiente. A temperatura da água tem variação lenta, podendo ser considerada relativamente estável. Como a temperatura tem influência em diversas outras propriedades da água, tal como solubilidade dos gases e densidade, essa relativa estabilidade garante à massa de água condições importantes para a presença de organismos vivos.

A tensão superficial é fundamental para a interação dos organismos com o meio físico, afetando flutuabilidade de organismo, por exemplo. No ambiente natural, pode-se considerar que a tensão superficial da massa de água é muito estável.

Cor é a propriedade que se relaciona com a transmissão de luz através da água. Presença de pigmentos dissolvidos dá diferentes colorações à água, e isso, por sua vez, afeta a penetração dos diferentes espectros do raio luminoso, com grande impacto para os seres vivos na água. Essa coloração também acaba sendo uma propriedade estética que influencia a utilização da água.

Turbidez é a propriedade resultante da dispersão dos raios luminosos pela presença de partículas em suspensão. Essas partículas podem ser predominantemente minerais, no caso de corpos de água que arrastam partículas de solo, como podem ser predominantemente orgânicas, no caso da presença de algas microscópicas.

2.2 Propriedades químicas da água no ambiente natural

No grupo de propriedades químicas da água, podemos listar salinidade, concentração de gases, potencial hidrogeniônico (pH), sais minerais e compostos orgânicos como aqueles que usualmente têm grande significado para o meio biótico presente na água.

A salinidade pode ser caracterizada pela presença de sais dissolvidos. Devido ao fato de a água ser um solvente com ampla capacidade, pode-se encontrar dissolvidos na massa de água diversos sais minerais, originados dos solos e rochas por onde a água passou. A classificação como água doce, água salobra ou água salina procura representar a amplitude de concentrações de sais possíveis.

Os gases dissolvidos em ambiente natural estão relacionados àqueles presentes na atmosfera, com ênfase no oxigênio e no gás carbônico. No caso específico do oxigênio, as concentrações presentes na massa de água têm grande impacto nos organismos presentes, condicionando a presença de organismos aeróbios, entre os quais estão incluídos os peixes. Embora a disponibilidade de oxigênio na atmosfera seja relativamente alta (cerca de 21%), a solubilidade desse gás na água é limitada; em condições ideais, atinge-se a concentração da ordem de 9 mg/L (SAWYER *et al.*, 2003). Concentrações abaixo de 2 mg/L tornam-se extremamente limitantes para a presença de organismos aeróbios na massa de água.

O gás carbônico dissolvido na água é essencial para o metabolismo dos organismos autotróficos. A origem do gás carbônico na massa de água deve-se, prioritariamente, às atividades biológicas dos organismos aeróbios presentes no meio aquático. Além disso, o gás carbônico é muito reativo com os carbonatos originados principalmente de águas de regiões calcárias. Nessas condições, ocorre uma reação de equilíbrio entre carbonato, gás carbônico e bicarbonato. Esse equilíbrio tem grande impacto no pH da água, que, por sua vez, tem grande impacto no meio biológico. A conclusão geral sobre pH é que ele representa a condição de equilíbrio do gás carbônico na água e que existe forte influência sobre o potencial de tamponamento resultante da presença de carbonato nessa água.

Dos diversos sais minerais possíveis de serem encontrados nas águas naturais, podemos destacar o grupo daqueles que são classificados como macronutrientes, quais sejam, os compostos de nitrogênio e os de fósforo. Esse grupo de nutrientes tem grande impacto na eutrofização do meio aquático, resultando em maior ou menor potencial para produção de biomassa pelos organismos autotróficos. De maneira geral a presença de nitrogênio e fósforo na água está associada a lançamento de compostos orgânicos na água, o que os associa ao fenômeno da poluição. Em alguns casos, a presença de rochas fosfáticas pode aumentar a concentração de fósforo no meio líquido.

Diversas outras substâncias minerais podem estar presentes na massa de água, com destaque para o ferro, manganês, enxofre, potássio e magnésio. Esses elementos são originados da formação das rochas por onde a água passa, tendo como resultado a seleção de organismos com necessidades específicas desses componentes.

A matéria orgânica presente na água pode ser proveniente de atividades biológicas naturais no próprio ambiente, como no solo ou na própria massa de água. Nesses ambientes, os seres vivos estão constantemente promovendo o ciclo do carbono que vai desde a conversão de carbono inorgânico em matéria viva pela fotossíntese, até a decomposição da matéria viva em compostos orgânicos mais estáveis pelos organismos decompositores. Matéria orgânica também pode atingir os corpos de água a partir do lançamento de resíduos orgânicos das atividades humanas, tais como lixo e esgoto.

2.3 Presença de organismos nas águas naturais

Tentar descrever de forma sintética a presença de organismos nas águas naturais é tarefa impossível sem que seja feita uma grande simplificação. No caso em questão, será feita a abordagem dos organismos microscópicos com maior impacto para a utilização das águas naturais para atividades antrópicas.

Nessa forma simplificada de apresentar o cenário, podemos apontar que os grupos mais importantes são vírus, bactérias, algas e cianobactérias. Boa parte da preocupação com a

presença desses organismos está associada à questão de saúde pública, embora a presença de algas possa também afetar atividades como a de geração de energia elétrica (no caso de agressividade da água para as turbinas e estruturas de concreto) e no tratamento da água (colmatação de filtros).

Pela complexidade de exames necessários, o que se faz rotineiramente é o acompanhamento da presença de grupos de bactérias (bactérias heterotróficas ou do grupo coliforme) e o acompanhamento da presença de algas e cianobactérias.

2.4 Qualidade da água em águas naturais – aquíferos

A qualidade da água em aquíferos encontra-se diretamente relacionada ao ciclo hidrológico e à constituição do solo e das rochas. Dessa forma, a variação da qualidade das águas subterrâneas em relação às suas propriedades físicas, químicas e biológicas dependerá da localização, da constituição rochosa adjacente e do período de formação do aquífero. Essa variação é mediada por vários fatores complexos que estão ligados, por exemplo, à evolução dos processos geológicos, hidrogeológicos e climáticos. Além disso, a resposta a esses fatores pode acarretar modificações tanto em escala espacial quanto em função da profundidade de localização do aquífero.

Dentre os parâmetros utilizados para avaliação da qualidade das águas subterrâneas, encontram-se a avaliação do pH, da temperatura, da condutividade elétrica e do potencial de oxirredução, a concentração de oxigênio dissolvido, a alcalinidade, bem como medidas da concentração de carbono total, nitrato e amônia. Porém, os limites para cada parâmetro avaliado responderá às interações água-solo e aos processos biogeoquímicos encontrados em cada região.

Da mesma forma, as atividades antropogênicas influenciam diretamente essa qualidade. O impacto na qualidade das águas subterrâneas pode vir devido não só à exploração abusiva dos aquíferos para obtenção de água, como também à contaminação por meio da disposição de poluentes no solo circundante que acabam por atingir as águas subterrâneas. Tanto contaminantes químicos quanto micro-organismos patogênicos podem alterar a qualidade da água dos aquíferos, dependendo do grau de mobilidade e da capacidade de infiltração.

Dentre as barreiras para manutenção da qualidade da água dos aquíferos, encontram-se a capacidade de diluição dos poluentes, a adsorção e atração dos poluentes às partículas do solo, bem como a capacidade degradadora das populações microbianas. Porém, quando a capacidade de imobilização ou atenuação dos contaminantes encontra-se ultrapassada, esses atingem os aquíferos, deteriorando sua qualidade da água.

2.5 Efeito das ações antrópicas na qualidade da água

As ações antrópicas afetam, de maneira geral, todas as propriedades relacionadas à qualidade da água. Isso se deve tanto à presença de cidades na bacia de drenagem de um determinado corpo de água, quanto a atividades produtivas como a agricultura, a pecuária e a indústria.

No grupo das propriedades físicas, o lançamento de águas residuárias industriais ou o uso de ambientes aquáticos como ambiente de troca de calor afetam significativamente a temperatura da massa de água. Despejos industriais e domésticos podem conter compostos

tensoativos (detergentes) que afetam significativamente a tensão superficial da água. O lançamento de despejos e mesmo o lançamento de águas pluviais modificam significativamente a cor e a turbidez do corpo d'água.

No caso das propriedades químicas, o lançamento de águas residuais ou o escoamento em áreas agrícolas é fator de grande impacto. Vale ressaltar a ampliação da presença dos macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e do aumento das concentrações de matéria orgânica, nesse caso avaliada pelo exame da demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

O equilíbrio dos organismos presentes nas águas naturais é grandemente afetado pelas ações antrópicas. Em especial, temos o efeito de eutrofização da massa de água com o lançamento de águas residuárias e de esgoto doméstico, resultando em aumento expressivo da massa de algas e cianobactérias presentes. Também temos a presença marcante de bactérias do grupo coliformes, atuando como indicadoras da presença de fezes e, consequentemente, aumento da possibilidade de presença de organismos patogênicos, como os vírus.

3 O solo como ambiente ecológico

De forma geral, pode-se dizer que os solos são compostos por matéria inorgânica mineral, matéria orgânica, água, ar e organismos vivos. O solo é considerado um ambiente altamente diversificado devido às características físicas, químicas e biológicas responsáveis por sua formação e estrutura. As variações observadas são dependentes não só das alterações climáticas, como da atividade metabólica dos organismos presentes, incluindo-se micro-organismos e plantas com suas raízes, mas também da influência humana. Dessa forma, as diferentes camadas do solo apresentam características abióticas particulares que influenciam diretamente a atividade biológica do solo. A seguir são abordados alguns dos fatores determinantes dessa heterogeneidade.

3.1 Características físico-químicas

Dentre as principais características físico-químicas do solo que influenciam a atividade biológica, destacam-se distribuição de água, oxigênio e matéria orgânica (nutrientes) e pH.

A disponibilidade de água encontra-se como um dos principais fatores responsáveis pela regulação da atividade biológica. A região com maior disponibilidade de água, porém não completamente saturada, oferece ambiente propício para a atividade biológica aeróbia. Além disso, a água é um meio de dissolução e transporte de nutrientes e gases, como o oxigênio.

A matéria orgânica presente no solo é composta pela biomassa, tanto viva quanto morta, de animais, plantas e micro-organismos, juntamente com os produtos de sua própria degradação (ácidos húmicos). A camada superficial do solo possui a maior concentração de matéria orgânica, a qual decai com a profundidade. Os nutrientes considerados limitantes para a atividade biológica nos solos são carbono e nitrogênio. Apenas a região próxima às raízes (rizosfera) apresenta concentrações maiores desses nutrientes devido à liberação de exsudatos pelas plantas.

A atmosfera do solo apresenta a mesma composição do ar, ou seja, oxigênio, nitrogênio e gás carbônico. Contudo, a disponibilidade de oxigênio torna-se responsável pela maior atividade biológica desse ambiente, uma vez que favorece o processo de respiração aeróbia mais

eficiente da degradação dos compostos orgânicos do solo em comparação com os processos anaeróbios e fermentativos.

O pH do solo afeta diretamente a solubilidade dos compostos químicos, alterando, assim, a disponibilidade e o transporte desses compostos. A maioria dos solos naturais apresenta valores de pH entre 6 e 8. Entretanto, solos com elevadas concentrações de matéria orgânica em regiões caracterizadas por elevada intensidade de chuvas tendem a possuir uma característica ácida devido à maior lixiviação de componentes ácidos e resíduos de degradação.

3.2 Características biológicas

O solo apresenta elevada atividade biológica resultante do metabolismo das populações microbianas presentes, principalmente, na camada mais superficial desse ambiente e, em particular, próximo às raízes das plantas (rizosfera). A camada superficial do solo responsável pela sustentação do crescimento vegetal, assim como pela decomposição da matéria orgânica de origem vegetal e animal, abriga uma grande diversidade de micro-organismos como bactérias (actinomicetes), arqueas, fungos, algas e protozoários. A distribuição, a diversidade e a estrutura das populações de micro-organismos do solo encontram-se diretamente relacionadas às características físicas e químicas mencionadas anteriormente. A maioria dos micro-organismos do solo apresenta metabolismo aeróbio, localizando-se na região insaturada, principalmente na superfície. Nas zonas saturadas de água, somente micro-organismos anaeróbios são capazes de crescer. As espécies microbianas colonizadoras dos solos são aquelas adaptadas às condições de estresse abiótico (características físicas e químicas) e biótico (competição entre micro-organismos) encontradas nesse ambiente.

As bactérias são o grupo mais abundante na ordem de 10^8 a 10^{10} células/g de solo (MAIER *et al*., 2009). As espécies bacterianas apresentam características que as favorecem no solo, tais como metabolismo diverso, tamanho reduzido, capacidade osmorreguladora e maior capacidade de obtenção de compostos orgânicos simples. Como exemplos do metabolismo autotrófico, destacam-se as bactérias participantes do ciclo do nitrogênio, oxidação do enxofre e ferro. Dentro do grupo bacteriano com metabolismo heterotrófico, encontram-se os grandes responsáveis pela degradação e ciclagem de diferentes compostos. Além das bactérias simbiônticas responsáveis pela fixação do nitrogênio atmosférico, as espécies participantes do ciclo do carbono (como as produtoras de antibióticos e inseticidas, metanotróficas, etc.) possuem importante papel na degradação de moléculas orgânicas complexas. Dentro desse grupo, os actinomicetes formam um grupo particular por se manter em condições de estresse hídrico, temperatura e pH elevados, atuando como importantes agentes biodegradadores do ambiente terrestre.

Essa mesma diversidade de vias anabólicas e catabólicas é também observada no grupo das arqueas. Esses procariotos se sobressaem ainda pela resistência a concentrações extremamente elevadas de sal, próximo à saturação (halofílicas extremas), e também a temperaturas elevadíssimas como as hipertermófilas (acima do ponto de ebulição da água).

Juntamente com as bactérias, os fungos filamentosos, segundo grupo mais abundante no solo (10^5 a 10^6 células /g de solo), exercem importante papel como decompositores, atuando na ciclagem de compostos orgânicos tanto simples (açúcares) como complexos (celulose e lignina). Por possuírem maior resistência à dessecação e às condições ácidas, além possuírem grande diversidade enzimática, algumas espécies de fungos são também capazes de degradar compostos poluentes.

Como parte das populações microbianas, embora em número reduzido, são também encontradas espécies de algas e cianobactérias que possuem importante papel na formação do solo por meio de seu metabolismo. Limitados à superfície onde a luz solar está presente, por meio do metabolismo fotossintético esses micro-organismos fornecem carbono para o meio (fixação de CO_2) e produzem ácido carbônico que contribui para o processo de intemperismo do solo. Além disso, auxiliam na agregação das partículas por meio da excreção de polissacarídeos.

Finalmente, deve-se mencionar o papel dos protozoários presentes no solo. Como maioria heterotrófica, esses micro-organismos se alimentam das bactérias, fungos e algas presentes, funcionando, assim, como predadores. Espécies flageladas, ciliadas e ameboides são encontradas no solo e, em geral, próximas às raízes das plantas, região que, por sua vez, possui elevadas densidades de bactérias para serem consumidas.

Podemos dizer que, durante a formação do solo, ocorre, de certa forma, o favorecimento do crescimento dos micro-organismos. Os micro-organismos encontram-se agregados às partículas do solo, crescendo de forma colonial entre os poros. O desenvolvimento colonial dos micro-organismos apresenta vantagens, como maior proteção contra predação (protozoários), acesso à maiores concentrações de nutrientes resultantes do próprio processo de degradação das células formadoras das colônias e, principalmente, formação de um microambiente mais favorável ao crescimento.

Como mencionado anteriormente, a distribuição dos micro-organismos no solo responderá a uma série de fatores. Entre os mais importantes, destaca-se a disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes. Assim, a partir da superfície em direção às camadas mais profundas, tem-se o decréscimo da concentração de micro-organismos e, em consequência da atividade biológica de degradação, a redução das concentrações de matéria orgânica e oxigênio. É importante ressaltar que a atividade metabólica dos micro-organismos do solo encontra-se como principal forma de eliminação de poluentes presentes no ambiente terrestre.

4 Efeitos da infiltração e da percolação na qualidade da água

No ciclo hidrológico, a infiltração da água que atinge o solo é uma das etapas que se seguem à precipitação. Enquanto temos o solo não saturado, a água infiltrará; ao longo do processo de infiltração, há incremento da umidade da camada superficial do solo até que esta se torne saturada. Com a saturação, há o decréscimo da infiltração até que seja atingido um equilíbrio, com o excedente da precipitação formando o escoamento superficial.

A percolação no interior do solo é responsável pelo transporte da água infiltrada pela superfície para camadas mais profundas. Esse processo é responsável pela realimentação do lençol freático e de aquíferos mais profundos.

De maneira geral, pode-se afirmar que os processos de infiltração e percolação de água no solo são dependentes da porosidade do solo, a qual está intimamente relacionada com os elementos constituintes do solo, além de fatores adicionais, como a presença de raízes de plantas. Dessa condição geral, pode-se concluir que a infiltração e percolação podem ser comparadas com um processo de filtração de água em meio poroso, onde as velocidades de escoamento são muito baixas. No transporte da água pela matriz do solo acontecem fenômenos de retenção de partículas na matriz porosa, adsorção de elementos na superfície dos grãos do solo e processos de conversão bioquímica efetuados pelas raízes, bem como transporte de solução para a planta.

Ao ser infiltrada e percolar pelo solo, a água sofre modificação na sua qualidade. Isso vale tanto para a água da chuva, que, ao chegar ao solo, pode ter diferentes compostos suspensos ou em solução incorporados ao longo da trajetória da gota de chuva, quanto para a água que é intencionalmente dispersa sobre o solo e que tem sua qualidade dependente do ponto de captação. Os mecanismos envolvidos nesse processo de modificação da qualidade da água são muito diversos e é interessante apresentar alguns detalhes dos principais.

4.1 Principais mecanismos de melhoria da qualidade da água infiltrada no solo

O solo não pode ser visto somente como um meio físico, onde as plantas superiores se fixam, mas principalmente como o habitat de organismos microscópicos, responsáveis talvez pelos ciclos mais importantes da natureza. Esses micro-organismos decompositores transformam a matéria orgânica morta que vem a se depositar no solo em compostos minerais, os quais são elementos indispensáveis ao processo da fotossíntese, pelo qual as plantas verdes produzem matéria orgânica viva. Portanto, é bem provável que, sem esse elo na cadeia trófica, a vida em nosso planeta já teria deixado de existir.

O solo tem uma composição variável de lugar para lugar, embora em um mesmo local sua composição varie relativamente pouco com o tempo. O solo é composto basicamente por cinco parcelas, quais sejam: i) parcela mineral; ii) matéria orgânica; iii) ar; iv) água; e v) micro-organismos vivos.

De certa forma, a proporção entre os componentes está intimamente relacionada. Quanto menores as partículas da parcela mineral, maior a quantidade de vazios entre elas, numa mesma porção de solo, implicando maior parcela ar-água, já que esses dois componentes ocupam esses vazios. Isso possibilita que haja maior proliferação de organismos vivos. Todavia, partículas muito pequenas dão diâmetros de vazios muito pequenos, fazendo com que a percolação de água e do ar no solo seja dificultada, restringindo, dessa forma, o aparecimento de seres vivos.

Como em todos os fenômenos de transporte, a percolação de ar e água no solo dá-se por diferença de concentração. No caso do ar, como no solo existe uma atividade biológica que consome oxigênio, a concentração desse elemento baixa, de forma que a concentração na atmosfera torna-se maior. Desse modo, forma-se um fluxo de ar no sentido atmosfera-solo. Quanto ao CO_2 liberado pelos organismos, o mecanismo é semelhante, porém com sentido contrário. Esse intercâmbio, de certa maneira, explica a maior concentração de organismos junto à superfície.

A parcela viva do solo é bem pequena, se comparada com as outras. Todavia, devido à sua função nos mecanismos de depuração, sua importância é facilmente compreendida.

Além dos micro-organismos, o solo como meio físico-químico atua sobre os elementos presentes na água em percolação, auxiliando na modificação da qualidade dessa água. O efeito de filtração, para retenção de partículas suspensas na água, e a capacidade de adsorção iônica das argilas são exemplos dessa atuação.

Como vimos, o ecossistema formado pela interação do meio físico com os organismos presentes no solo é bastante complexo, o que faz com que o equilíbrio resultante dessa interação seja bastante estável. Se o afluxo de compostos presentes na água estiver dentro da capacidade de absorção desse ecossistema, as reações bioquímicas e físicas resultarão na estabilização desses compostos.

Para uma visão geral sobre os mecanismos de depuração dos componentes presentes na água que infiltra no solo, são apresentados a seguir os principais processos relacionados com os principais componentes.

4.1.1 Matéria orgânica biodegradável

Os compostos orgânicos biodegradáveis são estabilizados pela integração de processos físicos, químicos e biológicos. A parcela não solúvel é retida nos interstícios do solo, pelo efeito de coar, e então é atacada pelos micro-organismos presentes, que efetuam sua estabilização. A esse respeito, é importante ressaltar que, em condições anaeróbias, há a colmatação dos poros do solo, inviabilizando uma utilização continuada para a infiltração. Dessa maneira, é importante que se mantenham as condições aeróbias no processo, o que pode ser conseguido com intervalos entre as infiltrações de forma a permitir a aeração do solo.

Os compostos solúveis são estabilizados pela ação dos micro-organismos que ficam aderidos aos grãos do solo ou à zona radicular das plantas. O contato é feito por ocasião da percolação da água pelo solo ou do seu escoamento junto à zona de raízes.

Dessa forma, as plantas têm significado bastante especial nos processos, não só aumentando a aeração, como também fornecendo suporte para os organismos decompositores quando o solo tiver permeabilidade baixa.

4.1.2 Organismos

Uma das preocupações mais sérias com a infiltração de água com eventual contaminação no solo diz respeito aos eventuais organismos patogênicos presentes nessa água, os quais podem ter ação deletéria sobre a saúde do homem.

A retenção física no processo de infiltração e a ação dos micro-organismos autóctones ao solo são a forma mais eficiente de eliminação de patogênicos. Por ter naturalmente uma atividade biológica bastante intensa, a competição vital é fator altamente eficiente para extermínio de micro-organismos patogênicos que geralmente estão adaptados às condições reinantes no organismo do homem, totalmente diferentes daquelas existentes em solos aerados.

4.1.3 Nitrogênio e Fósforo

O conjunto solo-plantas bem como os processos vitais das últimas são os maiores responsáveis pela remoção de macronutrientes presentes nas águas infiltradas. O nitrogênio, quando na forma orgânica, de maneira geral não é absorvido pelas plantas, mas é utilizado na forma iônica, como amônio (NH^{4+}) e nitrato (NO^{3-}), os quais são conseguidos por meio de oxidação biológica do nitrogênio orgânico. O íon amônio é retido pela argila ou húmus presente no solo, que reduz bastante a lixiviação. Todavia, o íon nitrato é facilmente arrastado pela água que percola pelo solo, podendo atingir o lençol freático. Diante disso, vê-se que as plantas localizadas na região de infiltração têm papel importante na remoção de nitrogênio.

Como outra forma de remoção de nitrogênio, há a desnitrificação, fenômeno de redução do nitrato a nitrito e, finalmente, à forma elementar N_2, que escapa para a atmosfera. É um fenômeno biológico e ocorre na ausência de condições estritamente aeróbias.

O fósforo no solo, após oxidação, ou vai para a solução do solo e dessa forma é aproveitado pelas plantas, ou forma compostos inorgânicos com baixa solubilidade. No caso dos compostos orgânicos, o fósforo poderá ser fixado no solo por meio de: i) adsorção pelas argilas; ii) adsorção pelos hidróxidos de ferro e alumínio; iii) precipitação com o ferro, o alumínio ou o manganês; iv) formação de compostos de cálcio; v) formação de compostos orgânicos.

De maneira geral, os fenômenos de fixação do fósforo ocorrem nos primeiros 50 centímetros do solo. Quanto mais impermeável for o solo, mais facilmente essa camada superficial tenderá a acumular fósforo e, consequentemente, a capacidade de remoção de fósforo irá decrescendo. A matéria orgânica presente no solo pode ter papel importante nesse processo, uma vez que, ao ser decomposta, produz ácidos orgânicos que solubilizam os compostos de fósforo e, dessa maneira, permitem sua assimilação pelas plantas.

4.1.4 Metais pesados

Metais pesados solúveis são bastante problemáticos, pois podem ser incorporados na cadeia alimentar e sofrem processo de acumulação. Sua retenção no solo deve-se a fenômenos de adsorção em silicatos e matéria orgânica, além de precipitação com carbonatos.

Quando em regime anaeróbio, o gás sulfídrico proveniente da decomposição de compostos orgânicos precipita metais pesados, que são retidos pelo solo.

4.1.5 Compostos orgânicos resistentes à biodegradação

Compostos como os organoclorados, fenóis ou surfactantes são resistentes à biodegradação, sendo ainda bastante tóxicos. Sua remoção no solo é determinada por uma série de processos, como a adsorção pelos colóides do solo, volatilização, decomposição química, absorção pelas plantas. Vários desses processos podem ocorrer simultaneamente.

5 Usos da infiltração como processo tecnológico

5.1 Aspectos gerais envolvidos na infiltração como processo tecnológico

São diversos os casos em que se emprega o solo como agente depurador para a qualidade da água. Os objetivos do uso da infiltração como processo tecnológico podem ser resumidos como o uso das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo para tratamento de efluentes, aumento do potencial de recarga dos aquíferos, além do aumento da disponibilidade de nutrientes no solo para melhoria dos processos agrícolas. Como visto anteriormente, os processos envolvidos podem ser físicos (por exemplo, sedimentação e filtração), químicos (por exemplo, adsorção e precipitação) ou biológicos (por exemplo, biodegradação microbiana e absorção pelas raízes das plantas).

De forma geral, a infiltração no solo tem a capacidade de reduzir a concentração de micro-organismos patogênicos, substâncias tóxicas, metais pesados, assim como sólidos em suspensão e matéria orgânica. Fatores ambientais, como regime de chuvas, temperatura, radiação luminosa (ultravioleta) e umidade, podem também regular os processos envolvidos

no decaimento desses compostos. Da mesma forma, a estrutura e solubilidade dos compostos químicos, alvo da remoção através da infiltração no solo, determinarão o maior ou menor grau de transformação possível durante o processo.

De qualquer forma, o uso da infiltração em solo como processo de tratamento de água, remoção de poluentes e contaminantes de efluentes (domésticos ou industriais) deve sempre levar em consideração as características do solo, os possíveis impactos que poderão ser causados pela passagem do líquido nas diferentes zonas do solo e, principalmente, o potencial de contaminação das águas subterrâneas.

5.2 Processo de infiltração – águas naturais

Como forma de se utilizar a estrutura do solo como meio filtrante para a melhoria da qualidade da água de mananciais superficiais (lagos e rios), a infiltração em margem encontra-se como tecnologia promissora. Dessa forma, a captação indireta, através de poços perfurados de forma a promover o escoamento da água por meio da criação de uma diferença de nível, faz com que possíveis substâncias contaminantes presentes nas águas superficiais possam ser removidas ao longo do processo de infiltração através da matriz (meio granular natural) do solo.

Durante o processo de infiltração, pode ocorrer uma mistura de águas com diferentes características em relação a conteúdo de poluentes, micro-organismos e substâncias dissolvidas. Os compostos orgânicos presentes na água são, em sua maioria, retidos no material sedimentar do solo, podendo sofrer degradação pela microbiota indígena. Normalmente, uma zona de anaerobiose pode ser criada, favorecendo a imobilização de metais pesados. Da mesma forma, na região caracterizada pela maior disponibilidade de oxigênio, poderá ocorrer a degradação de compostos orgânicos poluentes e redução de sua toxicidade.

Em relação aos contaminantes orgânicos como hidrocarbonetos, aromáticos e clorados, assim como pesticidas, os mecanismos responsáveis pela atenuação natural desses poluentes geralmente ocorrem pelo processo de sorção à matéria orgânica presente no solo. Desse modo, quanto maior o conteúdo de carbono orgânico no solo, maior a capacidade de remoção desses compostos da água infiltrada.

Quanto mais baixa a velocidade de infiltração da água no solo, maior será a eficiência do processo de depuração. A baixa velocidade de escoamento aumenta o contato da água com as partículas do solo e, consequentemente, com os micro-organismos que nelas crescem aderidos, favorecendo sua purificação. De maneira semelhante, o processo de percolação lenta pelo solo pode garantir uma proteção a mais para os reservatórios de águas subterrâneas. A água que percola lentamente e em fluxo desorganizado pelos interstícios do solo do manancial em direção aos poços e que porventura chegar aos aquíferos estará sendo então tratada pelos vários fenômenos que acompanham o processo de infiltração no solo, quais sejam: filtração, biodegradação, sedimentação, adsorção, disperção e, finalmente, diluição pela mistura com as águas subterrâneas, evitando a possível contaminação da água desses aquíferos.

5.3 Processo de infiltração – efluentes de processos

Quando o processo de infiltração no solo está direcionado para o tratamento de efluentes líquidos oriundos de diferentes processos, a atenuação natural dos contaminantes encontra-se

como principal fenômeno responsável pelo tratamento. Como mencionado anteriormente, embora o processo de atenuação natural envolva vários fenômenos, como dispersão, diluição, sorção, volatilização e estabilização química do contaminante, o mecanismo primário de remoção dos poluentes resume-se ao processo de biodegradação.

Tanto efluentes contendo compostos químicos sintéticos, os xenobióticos (origem do grego: estranho à vida), quanto substâncias de uso doméstico e industrial, como detergentes, lubrificantes, pigmentos, biocidas, entre outros, são passíveis de degradação pelos processos de infiltração no solo.

Quando se trata de efluentes provenientes dos sistemas de esgotamento sanitário, muitas vezes torna-se necessária a existência de um pré-tratamento, geralmente para remoção de sólidos grosseiros, antes que o efluente líquido possa ser introduzido no solo. Uma das formas mais utilizadas de infiltração como processo de tratamento encontra-se na aplicação desses efluentes sobre uma área coberta por vegetação. O efluente aplicado com baixa taxa percola no sentido tanto horizontal como vertical, através das camadas do solo, proporcionando maior contato do líquido e, consequentemente, remoção dos contaminantes. A eficiência torna-se maior quando se aplica o efluente de forma cíclica, para que seja mantida a condição de aerobiose do processo. Dessa forma, o ecossistema do solo, incluindo-se a vegetação presente, proporciona eficiente degradação dos compostos poluentes e promove o tratamento natural do efluente infiltrado.

Embora ensaios de biodegradação de compostos sejam geralmente realizados com a matriz do solo na ausência de vegetação, sabe-se que a interação do solo com o sistema da rizosfera, no qual a atividade, diversidade e concentração microbianas encontram-se aumentadas, proporciona maior possibilidade de degradação de grande variedade de compostos tóxicos e poluentes.

5.4 Contaminação versus *remediação*

Durante o processo de remediação, busca-se sempre a obtenção de níveis de degradação dos contaminantes e poluentes para que sejam atingidos os limites inferiores aos valores aceitáveis e estabelecidos pela legislação vigente.

Como vem sendo descrito, a degradação dos poluentes dissolvidos na água ou presentes no solo depende de uma série de processos. Porém, para o sucesso da remediação de áreas contaminadas, uma importante questão reside no grau de disponibilidade desses poluentes para que ocorra sua degradação. Como visto, em geral, quando os contaminantes encontram-se adsorvidos às partículas minerais ou orgânicas do solo, o processo de degradação apresenta maior eficiência. Por outro lado, quando esses compostos estão oclusos nas partículas, o processo de degradação encontra-se dificultado. Diante disso, para a eficiência da remediação de áreas contaminadas, a substância alvo precisa estar acessível para que ocorra a efetiva redução de sua toxidez, mobilidade ou volume.

A utilização da capacidade metabólica da microbiota indígena do solo na degradação de compostos poluentes, ou biorremedição, encontra-se como alternativa no processo de tratamento. Porém, para o sucesso da biorremediação, são necessárias condições adequadas para o crescimento dos micro-organismos. Condições tais como pH, presença de nutrientes e matéria orgânica para garantia de crescimento microbiano e temperatura adequada à atividade celular são fatores importantes para ocorrência da degradação biológica de compostos poluentes.

Para a melhoria do processo natural de remediação *in situ* e para o aumento da eficiência dos processos de biodegradação, algumas medidas podem ser utilizadas. Entre elas, destaca-se a adição de nutrientes (nitrogênio e fósforo), a introdução de gases estimulantes do metabolismo microbiano, como oxigênio ou metano, além da possibilidade de inóculo de micro-organismos (culturas puras ou consórcio microbiano) conhecidamente capazes de degradar compostos específicos. Da mesma forma, o emprego de surfactantes para aumentar a disponibilidade dos poluentes pode melhorar a degradação de compostos como hidrocarbonetos e pesticidas.

Apesar de promissora, a utilização da biorremediação pode ter sua eficiência reduzida devido a fatores como a heterogeneidade do rejeito e elevada concentração, persistência e toxicidade do contaminante que poderão inviabilizar a atividade degradadora dos micro-organismos do solo.

6 Considerações finais

Ao apresentar alguns pontos importantes que correlacionam a infiltração de água no solo e o aspecto qualidade, procurou-se ressaltar que existe uma interdependência entre o processo de infiltração e a qualidade da água, sem que se possa dizer o que é efetivamente causa e o que é efeito. Compreender a existência dessa interdependência é o primeiro passo para a utilização racional do processo de infiltração de água no solo; entretanto, vale ressaltar que os conceitos apresentados precisam ser aprofundados para que resultem em efetivas diretrizes para projeto.

Referências bibliográficas

EDMUNDS, W. M.; SHAND, P. (2008). Natural groundwater quality. Oxford: Blackwell Publishing. 469 p.

MAIER, R. M.; PEPPER, I. L.; GERBA, C. P. (2009). Environmental microbiology. 2nd ed., Oxford: Elsevier.598 p.

NEMEROW, N. L.; AGARDY, F. J.; SULLIVAN, P.; SALVATO, J. A. (2009). Environmental engineering. Water, wastewater, soil, and groundwater treatment and remediation. 6th ed., New Jersey: John Wiley & Sons. 550 p.

PÁDUA, V. L. (2006). Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas para tratamento de água para consumo humano. Projeto PROSAB, ABES, Rio de Janeiro.504 p.

SAWYER, C. N.; MACCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. (2003). Chemistry for environmental engineering and science. 5th ed., New York: MacGraw-Hill. 752 p.

SINGH, V. P., STAPLETON, R. D. (2002). Biotransformations: bioremediation technology for health and environmental protection. Amsterdam: Elsevier.614 p.

Capítulo 9
O comportamento de solos não saturados submetidos à infiltração

Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
José Camapum da Carvalho
Silvio Romero de Melo Ferreira
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

1 Introdução

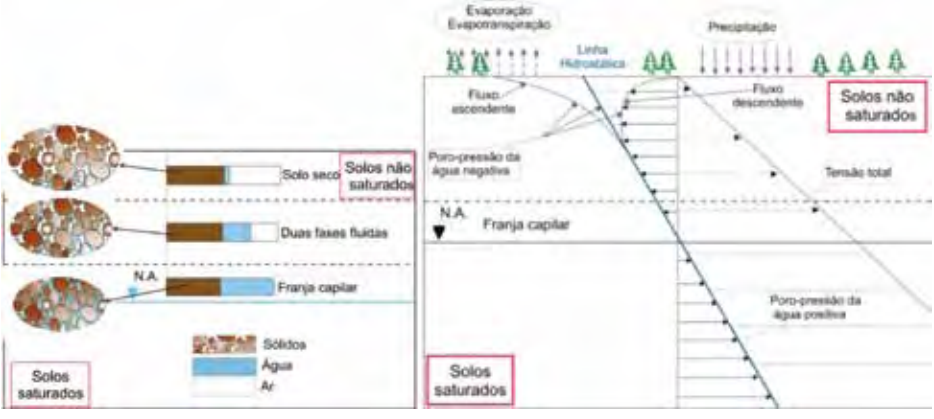
Os solos submetidos a processos de infiltração estão, na maioria das situações, na condição não saturada. Tal condição é resultado de um conjunto de fatores, dentre os quais se destacam: a) a proximidade com a superfície do terreno, submetido à evaporação; b) os gradientes de carga hidráulica que determinam o regime de fluxo, especialmente o gradiente correspondente à carga altimétrica; c) a posição do lençol d'água, muitas vezes profundo. Pode-se considerar que outro fator primordial para o estabelecimento de uma condição predominantemente não saturada do solo é o balanço hídrico ao longo do ano. Regiões áridas e semiáridas, assim como regiões com períodos chuvosos limitados a uma época específica do ano, são submetidas a condições atmosféricas que promovem a não saturação do solo.

A infiltração de água no solo produz variações no estado do solo, ou seja, nas tensões (totais líquidas e sucção matricial) e nos índices físicos, como a umidade e o grau de saturação. Tais variações são naturalmente experimentadas pelo solo ao longo do ano, devido às variações sazonais da condição atmosférica. Entretanto, a interferência no regime de flutuação das condições do solo, causada pelo homem ao implantar estruturas que facilitam a infiltração da água no solo ou, em outro extremo, a sua desidratação excessiva, pode alterar a amplitude dessas variações. As variações do estado do solo, que determinam o seu comportamento mecânico, podem ter impactos importantes em estruturas vizinhas. Torna-se relevante, portanto, o entendimento das consequências do processo de infiltração no comportamento do solo não saturado.

As flutuações de umidade e sucção matricial em trajetórias de molhagem provocam variações na resistência ao cisalhamento do solo (geralmente diminuição) e podem causar variações volumétricas. Tais variações volumétricas podem ser tanto de redução (colapso estrutural ou deformação oriunda da redução da sucção) quanto de aumento de volume (expansão estrutural ou mineralógica). De forma geral, os principais problemas de deslocamento ou deformação advindos da infiltração de água no solo podem ser divididos em duas classes: a) problemas associados com solos colapsíveis e b) problemas associados com solos expansivos. Considerando esse contexto, será apresentada, neste capítulo, uma visão geral do comportamento mecânico de solos não saturados quando submetidos à infiltração. Inicialmente, serão apresentados conceitos gerais aplicáveis a todos os solos não saturados. Em seguida, serão abordados aspectos específicos, referentes ao comportamento de solos expansivos e colapsíveis.

2 Alguns fundamentos da mecânica dos solos não saturados

O solo não saturado é definido como o solo cujos vazios não estão completamente preenchidos por água. No entanto, o domínio da mecânica dos solos não saturados se estende a uma situação mais abrangente, qual seja: aos solos saturados quando submetidos a poropressões de água negativas (Figura 1). Essas duas definições são, em princípio, contraditórias; por isso, sua compreensão é importante. A literatura define o solo situado acima do nível freático que se encontra no estado saturado, no qual atuam poropressões negativas, como franja capilar, atribuindo a sua saturação a mecanismos capilares, os quais fazem a junção entre os aspectos físicos, como o diâmetro dos capilares e o aspecto de energia de superfície, predominando o primeiro. Esse conceito precisa, no entanto, ser ampliado, englobando a energia decorrente das forças de adsorção, que constituem um fenômeno de natureza químico mineralógica. Dada a grande mistura químico-mineralógica e textural que caracteriza os solos na natureza, geralmente esses mecanismos atuam conjuntamente, podendo predominar um ou outro segundo a composição do solo. Aqui, a abordagem inicial será restrita ao aspecto convencional, abordando-se o problema como simples franja capilar. O capítulo 32 deste livro discute a questão da energia decorrente das forças de adsorção.



(a) (b)

Figura 1. O domínio da Mecânica dos Solos Não Saturados: a) condição do solo e b) distribuição de poropressões de água.

O solo da franja de ascensão capilar está geralmente saturado; mas, por estar sob poropressões de água negativas, é considerado pertencente ao domínio da mecânica dos solos não saturados. As poropressões de água em um solo não saturado estão frequentemente sujeitas a variações causadas pelas condições na fronteira entre o solo e a atmosfera e por alterações químicas que fazem variar a sucção osmótica. No caso de processos de infiltração, a poropressão da superfície pode aumentar drasticamente, seja durante eventos de precipitação, seja pela oferta de água facilitada por sistemas de infiltração compensatórios.

O solo não saturado é composto por quatro fases: partículas sólidas, água, ar e película contrátil. A Figura 2a ilustra essa situação para solo sedimentares e solos residuais pouco intemperizados – solos saprolíticos. Fredlund e Rahardjo (1993) apresentam uma descrição

das quatro fases em evidência na Figura 2a e argumentam que a película contrátil precisa ser reconhecida como uma fase do solo, devido às suas propriedades e ao seu papel no comportamento do solo. Pode-se afirmar que as fases água e ar fluem nos poros do solo quando submetidas a gradientes energéticos e o esqueleto sólido, juntamente com a rede de películas contráteis, equilibram-se e deformam quando submetidas a variações de esforços de tensões.

Para os solos tropicais profundamente intemperizados – solos lateríticos, a situação representada na Figura 2a permanece válida para os macroporos. Entretanto, a fração sólida nela destacada passa à condição de "aparente", tendo em vista sua constituição ser resultante de agregação de partículas minerais estabelecendo a presença de microporosidade no interior dos agregados, a qual é preenchida por água e/ou ar (Figura 2b). Embora em grande parte dos casos a microporosidade presente no interior dos agregados permaneça em estado saturado, quando ocorre perda de saturação, pode passar a atuar a situação descrita por esse mesmo modelo.

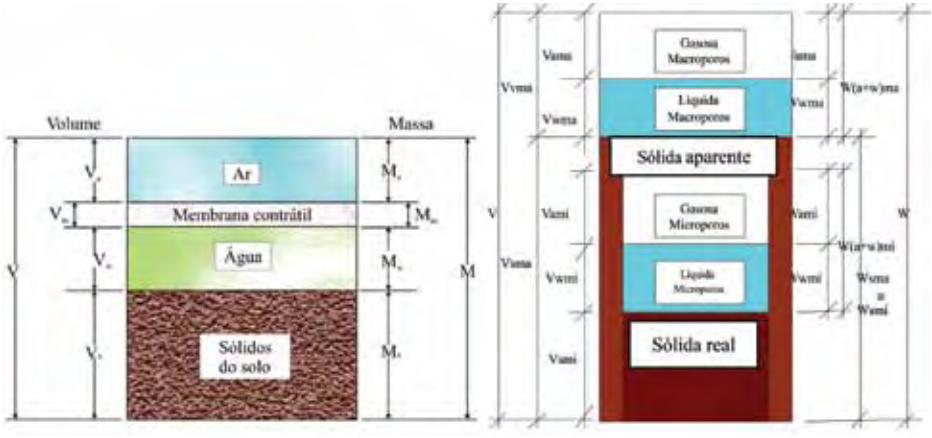


Figura 2. Diagrama de fases de um solo não saturado: a) diagrama convencional; b) diagrama ilustrando a divisão do solo em macro e microestruturas.

A continuidade das fases fluidas no solo não saturado varia à medida que o solo for submetido à variação de grau de saturação. Um solo arenoso com baixa umidade, tal como um solo na umidade higroscópica, possui uma fase ar contínua e uma fase água quase sempre descontínua. À medida que o solo for umedecido, a fase água passa a ocupar uma maior parcela dos vazios do solo, tornando-se gradualmente, assim como a fase ar, uma fase contínua e com menor déficit energético (i.e., maior energia). Se a quantidade de água do solo for aumentada suficientemente, a fase ar passa a se tornar gradualmente descontínua, até desaparecer. A transição da condição de continuidade das fases do solo deve ser bem compreendida, pois existem importantes implicações com respeito ao comportamento do solo. É importante observar que o grau de saturação que corresponde à passagem de condição contínua para descontínua pode depender também da textura do solo, assim como da distribuição de poros. Um solo mais fino pode manter a condição de continuidade da fase água em pacotes de argila presentes em solos pouco intemperizados ou no interior de agregados nos solos profundamente intemperizados, mesmo com baixos graus de saturação globais. O entendimento da condição de continuidade

das fases e de aspectos menos óbvios, como a dependência em relação à textura, são fundamentais para a compreensão do comportamento do solo não saturado.

Além do estado volumétrico das fases, é necessário examinar o estado de tensões no solo. O estabelecimento da disciplina "Mecânica dos Solos" é tradicionalmente associado com os esforços de Terzaghi e seus contemporâneos e ao estabelecimento do princípio de tensões efetivas. Já a Mecânica dos Solos Não Saturados tem seu estabelecimento formal mais vinculado aos esforços realizados entre as décadas de 1950 e 1970, motivados principalmente pelos estudos de "solos problemáticos": os solos colapsíveis e expansivos. O estabelecimento do par de variáveis de estado de tensões independentes (Figura 3) é um marco que deve ser ressaltado. O comportamento do solo não saturado deve ser interpretado em função de duas variáveis de estado de tensão independentes, sendo conveniente a separação das tensões totais e da poropressão de água. Tem-se, assim, a tensão total líquida, $(\sigma - u_a)$ e a sucção matricial, $(u_a - u_w)$.

É importante ressaltar que as duas variáveis de estado de tensão, $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$ reduzem-se a uma variável única (i.e., a tensão efetiva), conforme o solo tende à condição de completa saturação. À medida que o volume de água armazenada nos poros do solo cresce, o volume de ar começa a ser reduzido e os meniscos antes existentes passam a dar lugar a uma condição de ocupação dos volumes em que o ar é confinado no volume de água, estando o ar no formato de bolhas oclusas. Nessa nova condição, em que os meniscos não mais existem, qualquer volume de ar ainda presente se encontra sob pressão tal que $(u_a - u_w)$. Assim, quando o solo tende à condição de completa saturação, $(u_a - u_w) = 0$ e $(\sigma - u_a) = (\sigma - u_w)$. Além da energia capilar e da energia oriunda das forças de adsorção, é importante também ressaltar o papel da sucção osmótica, como variável de estado de tensões adicional. A sucção osmótica é frequentemente desprezada sob o argumento de que suas variações são pequenas e o impacto dessas variações em problemas típicos de engenharia não é relevante. Mas qualquer problema que envolva alteração da concentração de sais no solo deve ser examinado considerando com atenção as sucções osmóticas.

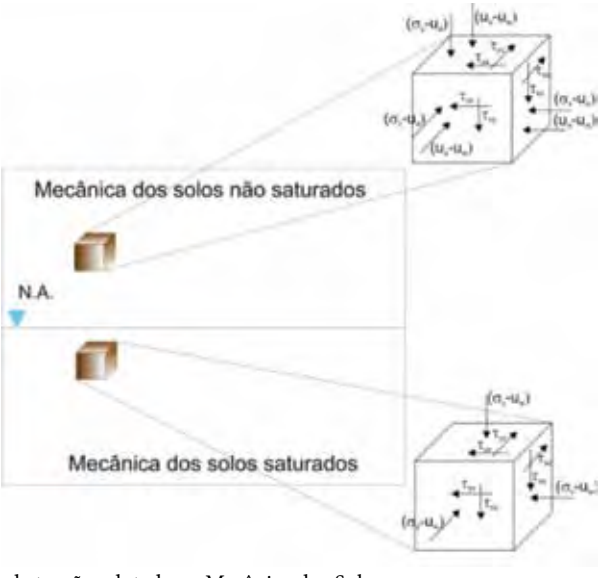


Figura 3. Variáveis de tensão adotada na Mecânica dos Solos.

O comportamento clássico de solos não saturados, assim como o de solos saturados, pode ser dividido em três categorias de fenômenos: a) fluxo, b) resistência ao cisalhamento e c) deformabilidade. O comportamento de solos não saturados quanto aos fenômenos de fluxo e à forma como tais fenômenos se dão é abordado em vários capítulos deste livro e, por isso, não será explorado aqui. O principal foco deste capítulo é a discussão do comportamento mecânico do solo não saturado durante processos de infiltração. Processos de infiltração e umedecimento não apenas modificam o estado de tensões atuante no solo e alteram a resistência ao cisalhamento, como também causam deformações, que podem ser explicadas à luz da mecânica dos solos não saturados.

Do ponto de vista dos tipos de materiais estudados, podem ser feitas algumas distinções entre a mecânica dos solos saturados e não saturados. A mecânica dos solos saturados tem como ênfase o comportamento de areias, siltes e argilas naturais, geralmente submetidas a poropressões de água positivas. Já a mecânica dos solos não saturados busca a compreensão do comportamento de solos naturais "dessecados", sejam eles transportados ou residuais, e de solos compactados. No caso de solos não saturados, as poropressões de água estão geralmente negativas. No caso em que as poropressões estão negativas, a interação entre as partículas do solo, o estado de tensões e as interações físico-químicas passam a ter um comportamento mais complexo, que merece especial atenção, tanto em escala macroscópica, quanto na escala das partículas individualizadas.

3 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados

A resistência ao cisalhamento de solos não saturados submetidos a processos de infiltração pode apresentar grandes variações em resposta às variações de umidade e, de forma mais fundamental, de sucção matricial. Variações de sucção osmóticas também podem ocorrer segundo a qualidade da água de infiltração. Destaca-se que, na sucção matricial aqui tratada, estão compreendidas as componentes capilares e aquelas oriundas de forças de adsorção. Conforme citado anteriormente, o estabelecimento das variáveis de tensões independentes pode ser utilizado como ponto de partida para a interpretação da resistência ao cisalhamento do solo não saturado.

A influência da sucção matricial na resistência ao cisalhamento dos solos vem sendo estudada há décadas. A Figura 4 apresenta a ilustração de diversos modos de variação da resistência ao cisalhamento com a alteração da sucção matricial, observados na literatura. O estudo de Donald (1956) com diversas areias é um exemplo de investigações pioneiras neste tema dentro do campo da mecânica dos solos. Donald (1956), utilizando ensaios de cisalhamento direto modificados para a imposição de sucção, observou resistências ao cisalhamento que partiam de um valor inicial, para sucções nulas, sendo esses valores correspondentes à tensão vertical aplicada. Vários ensaios sob as mesmas tensões verticais, mas com diferentes sucções matriciais, foram realizados. O aumento da sucção matricial produziu ganho na resistência até um limite, situado em sucções relativamente baixas, de 10 a 20 kPa. A partir do valor máximo de resistência ao cisalhamento, observou-se uma perda de resistência, conforme ilustrado para o "solo arenoso" da Figura 4.

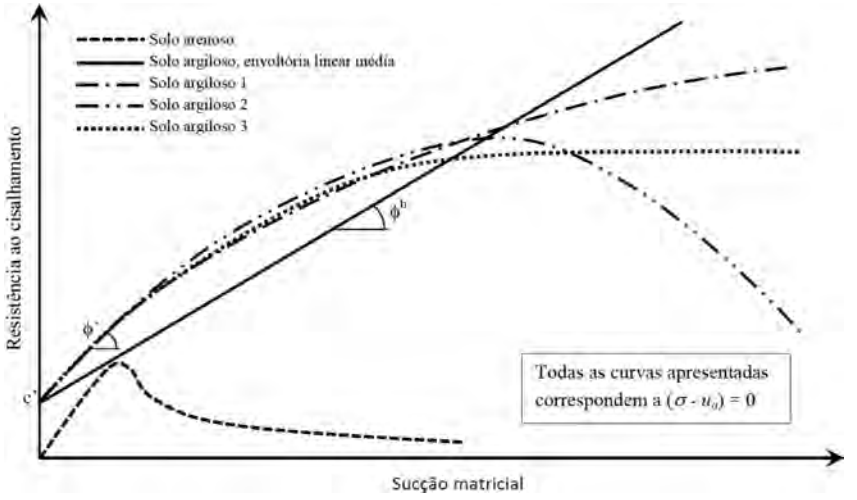


Figura 4. Possíveis modos de variação da resistência ao cisalhamento com a variação de sucção.

Comportamento mais simples foi observado por Escario (1980), que estudou a argila cinza de Madri, por meio de ensaios modificados de cisalhamento direto e triaxiais, ambos com controle de sucção. O autor observou, para a faixa de sucções de até 600 kPa, um aumento da resistência ao cisalhamento do solo que segue uma taxa constante (i.e., linear). Poucos anos depois, Camapum de Carvalho (1985), Gan (1986) e Escario e Sáez (1986) observaram, para outros solos argilosos, ganhos de resistência com a sucção que seguiam tendências não lineares. O primeiro autor registrou comportamento semelhante ao representado na Figura 4 pelo "solo argiloso 3", e os demais autores, comportamentos semelhantes ao representado na Figura 4 pelo "solo argiloso 1".

Conforme ressaltado por Gan (1986), a taxa de ganho de resistência ao cisalhamento parece seguir o valor do ângulo de atrito efetivo para valores de sucção baixos e, posteriormente, quando a sucção é aumentada, parece seguir taxas de ganho cada vez menores. O valor máximo de sucção para o qual o ganho de resistência segue o valor do ângulo de atrito é considerado como sendo correspondente ao valor de entrada de ar (FREDLUND *et al.*, 1996, VANAPALLI *et al.* 1996). O mecanismo observado indica a associação à estrutura do solo e ao estado de tensões nos micro e macroporos. Em um primeiro estágio, ocorrem variações nas tensões dos macroporos e, em uma segunda fase, passa a atuar o aspecto micro com interações ponto a ponto, que se transferem ao comportamento do solo como forças coesivas. Em uma terceira etapa, essa energia em escala pontual micro pode diminuir à medida que contatos interpartículas saturarem o seu efeito. A saturação do efeito conduz ao comportamento mostrado por Camapum de Carvalho (1985) (solo argiloso 3 na Figura 4), e a redução da energia por perda de continuidade nos contatos conduz ao comportamento do solo argiloso 2 mostrado na mesma figura.

Pode-se também observar comportamentos fortemente não lineares e com perda de resistência para altas sucções. Esse tipo de comportamento foi observado por Santos *et al.* (2006) para a argila porosa colapsível de Brasília (Figura 5). É importante ressaltar que se trata, de fato, de um solo argiloso, coesivo, composto de agregados com arranjo estrutural

que situa os poros em dois domínios: o dos microporos e o dos macroporos. As ligações entre os agregados podem se dar por simples contatos, por meio de cimentação proporcionada dos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, ou ainda por meio de pontes de argila. Em outros solos colapsíveis, esses contatos podem se dar por meio de matéria orgânica e principalmente de sais. Portanto, os mecanismos podem ir do simples ao complexo, conforme o tipo de solo.

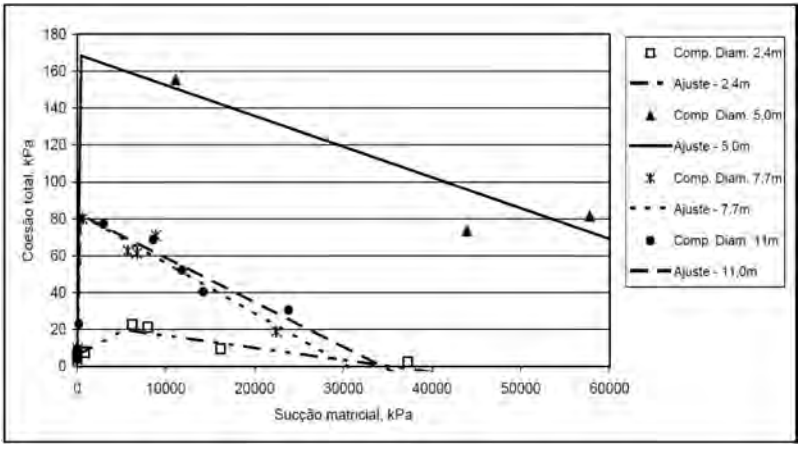


Figura 5. Variação de coesão aparente com o aumento de sucção para a argila porosa colapsível de Brasília (SANTOS, 2006).

No caso de solos como os estudados por Santos (2006), haveria duas fases de entrada de ar: a dos macroporos e a dos microporos. O aumento da sucção produz redução de volume de poros independentemente do valor da sução com relação aos valores de entrada de ar, embora a mais importante seja aquela variação até a entrada de ar nos macroporos. Com isso, quando há a retração dos agregados na fase de entrada de ar dos microporos, ocorre o comprometimento de alguns pontos de contato formados por cimentos ou pontes de argila, o que resulta na queda da resistência, como a indicada por Santos (2006).

A hipótese de variações lineares de resistência ao cisalhamento levou Fredlund *et al.* (1978) a proporem a extensão da envoltória de Mohr-Coulomb, para o caso de solo submetidos a sucções, da seguinte forma:

$$\tau_{ff} = c' + (u_a - u_w)_f \tan \Phi^b + (\sigma_f - u_a)_f \tan \Phi' \quad (1)$$

em que: τ_{ff} é a resistência ao cisalhamento do solo no plano de ruptura; c' é a coesão efetiva; $(u_a - u_w)_f$ é a sucção matricial no estado de ruptura; Φ^b é o ângulo que representa a taxa de variação de resistência ao cisalhamento com a variação de sucção matricial; $(\sigma_f - u_a)$ é a tensão total líquida no plano de ruptura, no estado de ruptura, e Φ' é o ângulo de atrito efetivo.

É importante ressaltar que a envoltória original de Mohr-Coulomb é um caso particular da equação mais geral, proposta por Fredlund *et al.* (1978). Dessa forma, pode-se afirmar que a Equação 1 é uma equação geral, para solos saturados e não saturados.

Outra característica importante da equação proposta é a sua compatibilidade com a noção de "coesão aparente" muito difundida na comunidade geotécnica, em que se reconhece

que o solo não saturado tem uma variação de resistência que, na prática, ocorre na forma de um ganho de coesão em função do aumento da sucção matricial. No caso da Equação 1, a coesão total, c_t, é dada por:

$$c_t = c' + (u_a - u_w)_f \tan \Phi^b \quad (2)$$

Fredlund e Rahardjo (1993) apresentam uma coletânea de valores de Φ^b publicados na literatura até aquela data. De forma geral, pode-se observar que os valores de Φ^b variam de 1/2 a 2/3 do valor de Φ'. Cabe destacar que efeitos de cimentação e outros estão incorporados nessa equação, por meio da coesão efetiva, embora, em alguns casos como o da deposição de sais nos contatos, esse efeito da cimentação possa ser facilmente destruído.

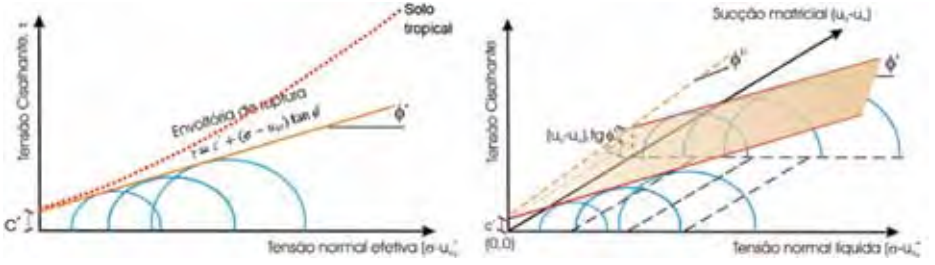
Finalmente, convém um comentário a respeito das possíveis críticas à utilização da Equação 1, mediante o fato de que muitos solos apresentam variações não lineares de resistência com a sucção matricial. Não se deve ignorar o simples fato de que a representação linear permite uma avaliação simples e de fácil aplicação prática. Além disso, vale lembrar que o mesmo procedimento é parte da prática na Geotecnia para a envoltória de solos saturados argilosos muito pré-adensandos, que frequentemente apresentam envoltórias não lineares. Já nos solos porosos colapsíveis, a perda de linearidade da envoltória pode se dar por meio de variações no estado físico do solo oriundas de colapsos estruturais que ocorrem conforme é aumentada a tensão confinante, conforme ilustra Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2005). É importante destacar que a perda de linearidade, nesse caso, dá-se de forma inversa ao convencionalmente obtido, ou seja, ocorre uma ascendência na envoltória de resistência.

A Figura 6 apresenta uma representação gráfica da envoltória de resistência do solo não saturado. A envoltória, que no caso de solos saturados é representada por uma relação linear no plano τ *versus* $(\sigma_f - u_w)$, passa a ser representada por um plano no espaço τ; $(\sigma_f - u_a)$; $(u_a - u_w)$. A inclinação do plano que define os estados de ruptura é dada por tan Φ^b e tan Φ'. Envoltórias como as estudadas por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2005) para os solos colapsíveis, cuja representação foi adicionada em caráter de ilustração na Figura 6a, representam peculiaridades dos solos tropicais atreladas a alterações estruturais oriundas do processo de colapso, cuja análise requer considerar a física do solo relativa à alteração de porosidade.

A variação não linear da resistência ao cisalhamento com a sucção matricial pode ser vista como uma resposta do solo à diminuição da "área molhada" onde a sucção de fato atua. Com base na observação relativa à redução da área molhada, Vanapalli *et al.* (1996) e Fredlund *et al.* (1996) apresentaram formulações teóricas semelhantes, relacionando a variação de resistência com a quantidade de água armazenada no solo. No caso da proposta de Fredlund *et al.* (1996), tal relação é dada da seguinte forma:

$$\tau_{ff} = c' + (u_a - u_w)_f \, \Theta^k \tan\Phi' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\Phi' \quad (3)$$

em que: Θ é o conteúdo volumétrico de água normalizado, dado por $\Theta = {}^{\theta}/_{\theta_{sat}}$; θ é o conteúdo volumétrico de água; θ_{sat} é o conteúdo volumétrico de água do solo saturado, e k é uma parâmetro de ajuste, que permite levar em conta a proporcionalidade não linear entre a taxa de ganho de resistência ao cisalhamento e os valores de Θ. De acordo com as propostas de Vanapalli *et al.* (1996) e Fredlund *et al.* (1996), a taxa de variação de resistência com a sucção é igual a tanΦ', enquanto o solo estiver saturado.



(a) (b)

Figura 6. Envoltória de resistência: a) solo com sucção igual a zero e saturado e b) solo com sucções maiores que zero.

No caso dos solos tropicais marcados pela presença de agregados, essa abordagem requer considerar que o conteúdo volumétrico de água intervindo no comportamento é, geralmente, aquele externo aos agregados e que atua principalmente em nível de macroporos e, por vezes, também de mesoporos. Tratar de modo global os vazios e a água presente nos solos tropicais profundamente intemperizados ricos em agregados pode conduzir a erros de avaliação dos comportamentos hidráulico e mecânico, conforme mostrado por Camapum de Carvalho e Pereira (2002) em relação ao comportamento mecânico.

Outra alternativa que pode ser encontrada na literatura para a representação de variações de resistência não lineares é dada por Vilar (2006). A proposta de Vilar (2006) tem caráter mais empírico e é baseada na observação de que o ganho de resistência pode ser bem representado por equações hiperbólicas. Dessa forma, a equação proposta toma o seguinte formato:

$$\tau_{ff} = c' + \frac{(u_a - u_w)_f}{a + b(u_a - u_w)_f} + (\sigma_f - u_a)_f \tan\Phi' \quad (4)$$

em que: a e b são parâmetros de ajuste. Os parâmetros a e b podem também ser estabelecidos com base em duas considerações teóricas: a) a taxa de ganho de resistência é igual a $\tan\Phi'$ para baixos valores de sucção, e b) o máximo valor de resistência ao cisalhamento, c_{ult}, pode ser obtido em ensaios com corpos-de-prova submetidos a "elevadas sucções" e tomado como parâmetro da curva:

$$a = \frac{1}{\tan\Phi'} \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{c_{ult} - c'} \quad (6)$$

Dessa forma, tem-se uma representação da resistência ao cisalhamento do solo não saturado utilizando simples parâmetros e ensaios. Vilar (2006) mostra a boa capacidade de representação da resistência ao cisalhamento para numerosos solos. Obviamente, a proposta de uso de uma relação hiperbólica não é capaz de representar bem aqueles solos que apresentam perda de resistência para maiores valores de sucção.

Valência *et al.* (2007), ao proporem uma metodologia para obter a envoltória de ruptura em solos tropicais agregados não saturados a partir de ensaios de cisalhamento direto em amostras saturadas e ensaios de tração indireta e de compressão simples sobre amostras não saturadas, mostraram, ao analisarem a curva característica da Figura 7a, que o parâmetro Φ^b

varia com a sucção atuante no solo (Figura 7b). Da comparação das duas figuras, constata-se que, até o término de entrada de ar dos macroporos, Φ^b corresponde a aproximadamente o ângulo de atrito do solo saturado. Desse ponto até o início da entrada de ar dos microporos presentes no interior dos agregados, a variação de Φ^b com a sucção matricial passa a ser praticamente linear. A partir desse ponto, Φ^b passa a diminuir, tendendo a zero à medida que a sucção aumenta e passa a atuar apenas no interior dos agregados. Esse modelo de comportamento concorda com o apresentado por Santos (2006) para o mesmo tipo de solo (Figura 5).

Em síntese, faz-se necessário, diante do mecanismo de infiltração, considerar o tipo de solo característico do maciço que definirá o seu comportamento mecânico frente ao aumento da umidade do solo, bem com os reflexos em obras vizinhas.

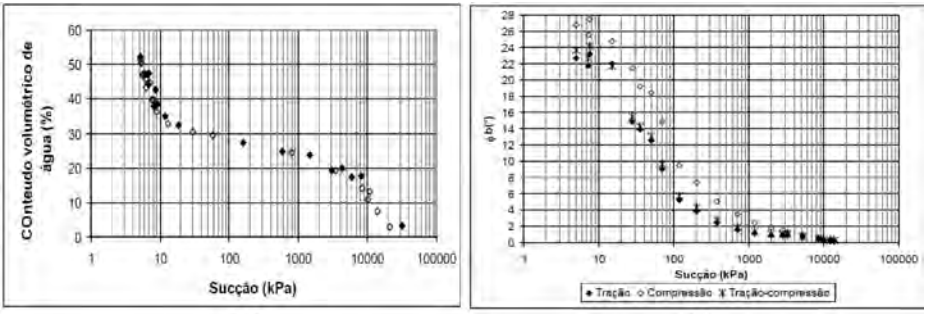


Figura 7. Resistência ao cisalhamento de um solo tropical bimodal: a) curva característica solo-água; b) variação de Φ^b com a sucção (VALÊNCIA *et al.* 2007).

4 Solos colapsíveis

Quando umedecidos durante um processo de infiltração, os solos não saturados podem aumentar ou reduzir de volume, dependendo de numerosas variáveis, sendo as principais:

- mineralogia e química do solo;
- distribuição granulométrica;
- estrutura do solo (tipo, energia e umidade de compactação ou origem do solo natural ou nível de intemperização pelo qual passou);
- característica do fluido percolante;
- história de tensões e/ou história da intemperização;
- estado de tensões inicial;
- características das variações de energia impostas ao solo (tensão externa, vibração, rotação das tensões principais, química do fluido, entre outros).

De forma geral, as mesmas variáveis e características que determinam a deformabilidade de solo saturados permanecem sendo fatores importantes para o comportamento de solos não saturados. Porém, características químico-mineralógicas e estruturais passam a ter um papel determinante no comportamento dos solos não saturados. Tem-se, por exemplo, que argilas com alta plasticidade podem exibir comportamento expansivo, caso as condições de variação de umidade e sucção sejam adequadas. Também podem sofrer expansão solos cuja

estrutura esteja sendo condicionada por energias, como tensões geostáticas ou induzidas e sucções, caso estas venham a ser diminuídas. Da mesma forma, solos argilosos e areias siltosas com estrutura aberta e baixa densidade frequentemente apresentam colapso estrutural quando saturados.

Os solos colapsíveis são geralmente compostos de minerais estáveis em presença de água como caulinita e quartzo. No entanto, é favorecida a condição de colapsividade quando tais minerais ou agregados de minerais são ligados por compostos químicos solúveis, como os sais, que são cimentos pouco frequentes nos solos brasileiros.

O papel do estado de tensões inicial é observado ao se constatar que um mesmo solo pode apresentar tanto colapso quanto expansão após a infiltração, dependendo das tensões totais líquidas durante a molhagem. A Figura 8a ilustra tal situação, observada por meio do ensaio "duplo oedométrico". Para baixos níveis de tensão total líquida, o solo da ilustração apresenta expansão após a molhagem, ao passo que, para altos níveis de tensão, esse solo apresenta colapso. Esse tipo de comportamento é característico de certos solos compactados, compostos de misturas de montmorilonita e areia ou em solo que simplesmente contenham argilominerais expansivos, como mostra Camapum de Carvalho (1985). Esse tipo de comportamento é considerado em alguns modelos de comportamento, tal como o *Barcelona Basic Model* (ALONSO *et al.*, 1990).

É importante ressaltar que essa situação não se repete para todos os tipos de solo. A argila porosa colapsível de Brasília, por exemplo, não apresenta qualquer expansão, mesmo para baixos níveis de tensão (GITIRANA Jr *et al.*, 2001).

O colapso dos solos pode ter origem em fatores externos e internos, mas, de modo geral, depende das características do solo, sendo as principais:

- estrutura metaestável, devido às tensões capilares, às forças eletromagnéticas e à presença de um agente cimentante, que conferem ao solo uma estabilidade provisória ou aparente;
- não saturação do solo, especificamente com grau de saturação inferior ao término de entrada de ar dos macroporos ou nos casos de solos ressecados em que variações de umidade conduzam a sucções inferiores às de entrada de ar dos microporos;
- índice de vazios maior que o de equilíbrio para tensões externas e internas nulas;
- estrutura marcada por distribuição de poros bimodal, contendo macro e microporos.

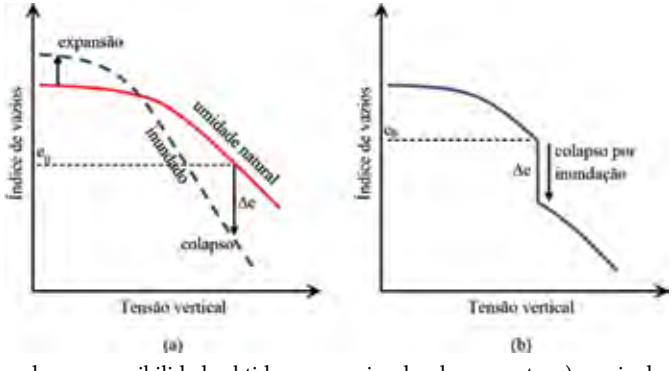


Figura 8. Curvas de compressibilidade obtidas em ensaios de adensamento: a) ensaio duplo oedométrico; b) ensaio oedométrico com inundação sob carregamento.

Como fatores externos condicionantes do colapso, têm-se:

- aumento das tensões induzidas;
- variação do estado de tensões externo ao ponto, por exemplo, quando se realiza a escavação de um túnel ou um corte, podendo essa variação se dar por simples rotação no eixo de tensões principais;
- aplicação de energia vibratória;
- infiltração de fluidos que podem causar ataque químico das ligações ou simplesmente afetar o balanço de energia com origem química;
- infiltração de água em solos não saturados.

É evidente que, para que ocorra colapso, não é necessária a presença de todos os fatores internos e/ou externos nem de todas as características.

De acordo com Araki (1997), o processo de colapso ocorre devido à diminuição localizada na resistência ao cisalhamento dos vínculos que mantêm a estrutura metaestável dos solos colapsíveis, ou devido à aplicação de tensões ou mesmo alterações do estado de tensões que superem a resistência limite desses vínculos. A autora mostrou, ainda, que os métodos existentes na literatura que buscam associar o colapso às propriedades físicas dos solos são de validade geralmente limitada aos solos que lhes deram origem, sendo pouco aplicáveis aos perfis de solos tropicais. É comum, por exemplo, associar solos colapsivos a altos índices de vazios; mas tal informação é de pouca utilidade, uma vez que solos notadamente não colapsíves ou até mesmo expansivos podem possuir índices de vazios igualmente altos. Outra característica frequentemente associada a solos colapsíveis é a baixa plasticidade. Deve-se, no entanto, ressaltar que mesmo solos com maior plasticidade podem sofrer colapso, dependendo do outros fatores, tais como sua estrutura e trajetória de tensões.

4.1 Ensaios para a avaliação de solos colapsíveis

Embora estudos específicos, como os relativos à influência do pH do fluido de inundação no colapso, sejam encontrados na literatura (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 1987), o colapso é comumente analisado durante a inundação. No entanto, o colapso por inundação não representa nada mais que uma condição particular indutora, pois o que define o potencial de colapso é o estado interno do solo, sua estrutura metaestável, a sensibilidade das ligações estruturais a ataques e alteração químicas, sua sensibilidade a diferentes formas de energia como as oriundas de cargas externas e de variações de umidade, como as que se dão no processo de infiltração das águas pluviais e servidas. Nesse último caso, intervém ainda energia de natureza química.

Em campo, o colapso do solo pode ser avaliado direta ou indiretamente, por meio de ensaios utilizados para outros fins, como os casos dos ensaios SPT, pressiométrico e provas de carga. Mas em todos eles, assim como nos estudos de laboratório, o que se analisa geralmente é o comportamento do solo na umidade natural e quando submetido aos efeitos da saturação.

Embora o colapso possa ter diferentes origens, no caso específico da infiltração de águas pluviais, interessa o colapso devido ao aumento do grau de saturação do solo. O ensaio oedo-

métrico do tipo duplo e o ensaio oedométrico simples constituem as principais ferramentas de análise e avaliação do potencial de colapsividade. Constituem ferramentas complementares de análise o ensaio de sedimentação com e sem o uso de defloculante, o ensaio de desagregação, a curva característica solo-água e a distribuição de poros.

No ensaio duplo oedométrico, dois corpos-de-prova idênticos são submetidos a ensaios oedométricos. Um é executado no solo em sua umidade natural, e o outro com inundação prévia (Figura 8a). No ensaio oedométrico simples, a inundação é realizada sob um carregamento vertical de interesse (Figura 8b). Essa última alternativa de ensaio pode ser vista como adequada por representar melhor o caminho de tensões experimentadas em campo. No entanto, a quantidade de informação obtida é consideravelmente mais limitada do que a resultante do ensaio duplo oedométrico. Geralmente o colapso obtido pelos dois métodos não são coincidentes, pois, ao se considerar o efeito da sucção, as trajetórias de tensões seguidas nos dois modelos experimentais não são iguais.

O ensaio duplo oedométrico, dada a sua simplicidade, é um dos mais utilizados para avaliar a colapsibilidade do solo. Com base em seus resultados, cujos parâmetros são apresentados na Figura 8a, pode-se calcular o coeficiente de colapso, ε_c, para a tensão de inundação desejada:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \tag{7}$$

em que: Δe é a variação do índice de vazios nessa tensão e e_o o índice de vazios nessa mesma tensão antes da saturação. Vargas (1977) considera que solos com coeficiente de colapso superior a 2% podem ser considerados potencialmente colapsíveis.

O ensaio de sedimentação com e sem defloculante para avaliação do potencial de colapsividade tem uma análise um pouco distinta da geralmente feita. Considerando-se o problema de colapso devido ao aumento do grau de saturação pela infiltração da água da chuva, sendo esta quimicamente pouco agressiva (nem sempre é o caso), resultados coincidentes de ensaios de sedimentação com e sem defloculante podem ter três interpretações: a) o solo não possui agregados; b) os agregados são estáveis em presença de defloculante e água (possibilidade geralmente descartada por ser improvável), ou c) o solo possui agregados instáveis em presença de água, sendo esta a característica preocupante. Ensaios de sedimentação com e sem o uso de defloculante com diferenças marcantes de textura apontam para solos de textura estável em presença de água.

É evidente que uma textura semelhante com e sem o uso de defloculante não é garantia de agregados instáveis em presença de água. Para que se chegue a tal conclusão, seria necessária a realização de um terceiro ensaio de sedimentação, agora em presença de álcool etílico, pois esta é uma substância que permite ao agregado manter-se estável. A diferença de textura em relação ao ensaio em água apontaria, então, para sua instabilidade frente à infiltração das águas pluviais. Esses solos também apresentam no ensaio duplo-oedométrico curvas distintas, o que indicaria, mas não confirmaria, a natureza instável dos agregados em presença de água. Nesse caso, a instabilidade pode também estar ligada à sensibilidade das ligações entre os agregados ao aumento da umidade.

Os ensaios de desagregação devem ser realizados considerando-se duas condições específicas: imergindo-se completamente um corpo-de-prova em água, observando-se o que

se passa, e imergindo-se progressivamente o corpo-de-prova em água. No primeiro caso, sua desagregação imediata aponta para o fato de que a fase ar assumiu valores positivos de pressão que superam a coesão real do solo, indicando que sua estrutura suportará pouco esses efeitos, potencializando o fenômeno do colapso quando ocorrer o avanço da frente de saturação. No segundo caso, a desestruturação aponta para a fragilidade da coesão real do solo. Em ambos os casos, faz-se necessário atentar para a possibilidade de desmoronamentos das paredes laterais de poços, trincheiras e valas de infiltração, pois esses desmoronamentos podem alterar a capacidade de infiltração do sistema.

A avaliação da colapsibilidade do solo com base na curva característica solo-água deve ser feita levando-se em conta a umidade ou o grau de saturação correspondente ao término de entrada de ar dos macroporos. Como os valores de sucção matricial atuantes nos macroporos são, geralmente, pequenos e próximos da coesão real dos solos argilosos e siltosos, $(u_a - u_w) < 10$ kPa, muitas vezes solos que se encontram com grau de saturação ou umidade superior a esse limite, provavelmente não apresentarão colapso quando submetidos ao processo de infiltração. Esta análise indica que a avaliação da colapsibilidade estrutural do solo é dependente do estado de saturação inicial. Diante dessa limitação, Camapum de Carvalho *et al.* (2009) propuseram a avaliação do potencial de colapso estrutural a partir unicamente do ensaio oedométrico na condição inundada. O método consiste em se gerar uma curva pré-colapso dada pela curva de adensamento do solo inundado menos o recalque imediato obtido em cada estágio de carga, considerando-se o intervalo de tempo de 15 segundos. O método se fundamenta no fato de que, excetuando-se o colapso por mudança da composição química do fluido de saturação ou ataque químico das cimentações, os demais se dão por variação da tensão aplicada ou por variação da sucção. Esse método permite avaliar o colapso total independentemente do grau de saturação inicial, prestando-se, portanto, a definir se o solo deve ser entendido ou não como colapsível e indicando as precauções a serem tomadas na implantação de sistemas de infiltração. O método não se presta, entretanto, a definir quanto o solo colapsará em função do estado inicial de hidratação.

Cabe destacar que a velocidade em que ocorre o colapso corresponde àquela em que se dão as variações de tensões e energias, em relação à estabilidade estrutural do solo. Assim, solos caracterizados por cimentações com resistência única tendem a colapsar tão logo seja imposta a variação de tensão capaz de rompê-las. Já os solos contendo cimentos de diferentes resistências tendem a colapsar progressivamente à medida que vai sendo atingido o comprometimento de cada elo.

Embora não exista uma metodologia para obtenção do valor de colapso do solo a partir da distribuição de poros de amostras colapsadas, Mascarenha (2008) observa que existe uma relação clara com a porosimetria, conforme ilustrado pela Figura 9, em que constam as distribuições de poros para amostras no estado natural (e = 0,71) e colapsadas. A primeira amostra colapsada foi umedecida até uma sucção de 50 kPa, carregada e posteriormente saturada a uma tensão de 800 kPa (e = 0,53). A segunda amostra colapsada foi carregada e saturada a uma tensão de 800 kPa (e = 0,45). Enquanto a microestrutura do solo se manteve constante nos três casos, a macroestrutura sofreu alterações após o colapso, com a diminuição da densidade dos poros na macroestrutura, sendo a diminuição tanto maior quanto maior o colapso.

Uma observação importante é que, mesmo submetida ao colapso sob uma tensão de 800 kPa, a amostra continuou apresentando poros com dimensões elevadas. Isso indica que esta não é a tensão de inundação que provoca colapso máximo, porque a existência de um colapso máximo no solo, a partir de um determinado valor de tensão, está relacionada à modificação máxima ocorrida na distribuição dos poros desse solo.

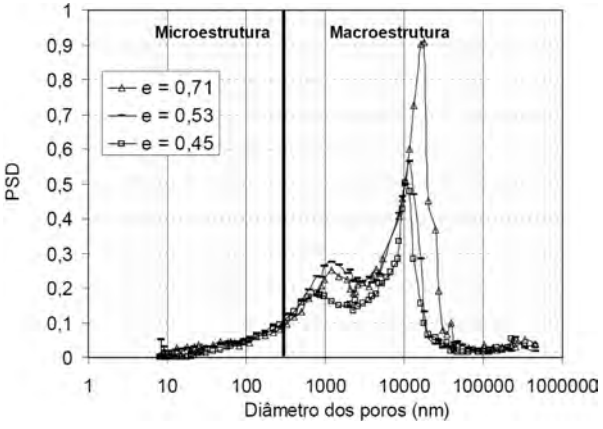


Figura 9. Relação entre o PSD e os diâmetros dos poros das amostras no estado natural e colapsadas (MASCARENHA, 2008).

4.2 O colapso por infiltração no campo

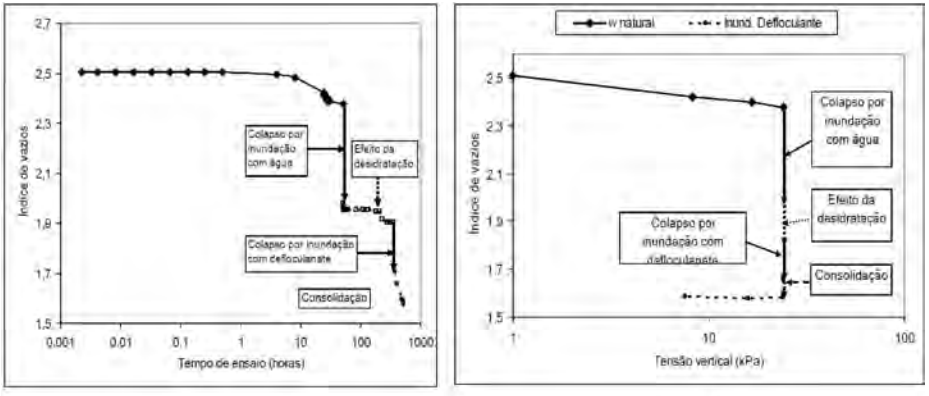
Para que se tenha uma noção mais ampla de como a infiltração concentrada das águas pluviais pode impactar o comportamento de uma obra, é apresentado aqui o caso de uma edificação (Figura 10) em que foi feito, para o nivelamento do terreno, um aterro com altura variando de 0 a 3 m aproximadamente. A obra envolveu também um trecho adjacente de corte, sem que houvesse preocupação com sua drenagem. O corte executado provocou, no período chuvoso, o represamento de água (Figura 10a), promovendo o umedecimento do solo de fundação do aterro sobre o qual foi implantada a edificação e, com isso, o seu colapso estrutural. Adicionalmente, para a implantação de fossa séptica e sumidouro, foi feita uma escavação a montante da edificação que também propiciou o acúmulo de água da chuva (Figura 10b). Nesse caso, o perfil de solo natural teve o seu estado de tensões ampliado pelo aterro a ele sobreposto e, com o aumento da umidade do solo de fundação, ocorreu o colapso, gerando recalque do piso da ordem de 5 cm, na parte mais alta do aterro.

Para avaliar o problema, foram realizados ensaios duplo oedométricos e ensaios com inundação do solo sob a carga equivalente à do aterro. A Figura 11a apresenta os resultados de recalque ocorridos ao longo do tempo quando da inundação do solo coletado a 1 m de profundidade abaixo da cota do aterro e submetido a uma tensão de 24 kPa. A Figura 11b apresenta a curva carga recalque nas diferentes etapas do ensaio (CAMAPUM DE CARVALHO, 2004). O ensaio foi realizado compreendendo as seguintes etapas: consolidação até a tensão de 24 kPa, inundação do solo com água destilada (ensaio convencional), retirada da água e

submissão do solo a desidratação, nova inundação do solo com solução de água contendo defloculante (simulando a água proveniente do sumidouro), retirada da solução e submissão do solo a nova desidratação.

(a) (b)

Figura 10. Impacto da infiltração em edificações: a) Represamento da água na área de corte e lateral à edificação; b) escavação a montante da edificação destinada à implantação de fossa e sumidouro.



(a) (b)

Figura 11. Análise experimental do colapso: a) recalque em função do tempo; b) variação do índice de vazios em função da tensão aplicada.

Os resultados obtidos mostram que, quando se faz a infiltração das águas pluviais, pode haver dois efeitos dele oriundos: o primeiro é o colapso estrutural do solo, e o segundo, recalques oriundos da desidratação pós-colapso. Esses recalques por desidratação pós-colapso podem ser muito importantes devido ao fato de a estrutura do solo ter sido quebrada na fase de colapso e a sucção que passa a atuar atingir valores muito elevados. Embora não seja tema deste livro, as figuras mostram ainda que, nesses solos, é necessária atenção especial à infiltração de águas servidas, observando-se que, após o colapso por efeito do aumento da umidade, ainda pode ocorrer colapso devido à alteração química. Essa constatação confirma o fato de que, geralmente, o colapso estrutural oriundo da infiltração de águas servidas é maior que aquele oriundo da infiltração de águas pluviais e potáveis.

5 Solos expansivos

Os solos podem ser mineralógica ou estruturalmente expansivos, ou ambos. São características dos solos potencialmente expansivos:

a) são solos geralmente não saturados;
b) são solos argilosos ou argilo-siltosos;
c) nos solos mineralogicamente expansivos, há a presença de argilo-minerais expansivos;
d) podem ser solos derivados de certas rochas ígneas, como basaltos, diabásios e gabros, e de certas rochas sedimentares, como folhelhos e calcários;
e) apresentam expansão em presença de água, o que pode gerar a obstrução de canais de fluxo, dificultando a passagem de água;
f) quando o fenômeno está ligado a variações de umidade, são regidos pela sazonalidade, expandindo sob aumento de umidade (redução da sucção) e contraindo com a elevação da sucção;

O fenômeno da expansibilidade é mais intenso nas camadas mais rasas do solo, devido aos níveis de tensão mais baixos. No entanto, devido ao processo de intemperismo, os solos residuais expansivos podem se encontrar recobertos por camadas de solo não expansivos como os solos lateríticos. No Brasil, os solos expansivos aflorantes ocorrem principalmente no semiárido da região nordeste. Sob camadas intemperizadas, os solos expansivos se fazem presentes no território nacional como um todo e dependem da rocha de origem e do processo de intemperismo pelo qual passou.

Os solos mineralogicamente expansivos, embora possam expandir por alívio das tensões externas, geralmente aumentam de volume com a elevação do teor de umidade. São solos que comumente possuem elevados valores de limite de liquidez e de índice de plasticidade. Já o solos estruturalmente expansivos têm a expansão atrelada ao alívio da energia neles atuantes, podendo esta se dar no campo das tensões externas, alívio de carga, ou no campo da energia interna, como, por exemplo, pela queda na sucção em um processo de infiltração de águas pluviais.

Aqui a fase água deve se dividir em duas: a) intercamadas do mineral e b) interpartículas. No caso dos solos mineralogicamente expansivos, as duas fases podem variar. Já no caso dos solos estruturalmente expansivos, apenas a segunda varia, uma vez que a estrutura do mineral é essencialmente estável frente às variações de umidade. Esse aspecto do comportamento é importante, por exemplo, para a permeabilidade, pois são medidos os vazios totais (intercamadas dos minerais e interpartículas), e as variações dos vazios interpartículas são menores. No comportamento mecânico, esse entendimento é igualmente relevante, pois nele também são importantes os vazios interpartículas e as tensões atuantes entre elas.

No fenômeno da expansibilidade, os argilominerais expansivos atraem a água para o espaço entre as camadas, aumentando a distância interplanar basal. Nesse caso, o aumento do volume está atrelado ao aumento de volume do próprio mineral. Esse volume não intervém no fluxo, exceto o oriundo da própria absorção estrutural do mineral. Nesse processo de expansão, a variação de volume total não corresponde à variação de volume dos canais de fluxo. Esses podem diminuir ou aumentar segundo o tipo de solo, mas serão sempre menores que a expansão registrada para o solo como um todo. Portanto, em consequência das variações

dos canais de fluxo, a expansão pode conduzir não só a um aumento de permeabilidade, mas também à sua redução.

A característica de expansão de um solo depende, primariamente, do tipo de mineral de argila nele presente, uma vez que nem todos os minerais argilosos experimentam modificações volumétricas, com variação de umidade. A instabilidade é importante para argilas como a vermiculita e, em especial, a montmorilonita. Outros argilominerais, como a ilita e a clorita, podem ou não ser expansivos. Os minerais de argila interestratificados contendo camadas de minerais expansivos também podem apresentar expansão em função do mineral e número de camadas presentes no interestratificado.

Os solos podem apresentar expansão mineralógica e estrutural, de tal modo que a presença de uma não elimina a outra. A expansão mineralógica se dá pela necessidade de hidratação das próprias camadas do mineral, sendo comum, devido à necessidade de neutralização das cargas de superfície, que conjuntamente também ocorra expansão estrutural, embora seja mais relevante a mineralógica. Já a expansão estrutural pode se dar por três motivos: pela neutralização de cargas de superfície durante a hidratação; por alívio da pressão de sucção e por alívio das tensões externas ao ponto. Apesar de a expansão mineralógica ser a maior, geralmente o comportamento hidráulico e mecânico é mais afetado pela estrutural, mesmo que de origem mineralógica, pois é a ela que está relacionada a variação de porosidade do solo. É evidente que, quando se está referindo à alteração do comportamento, não se está tratando da expansão propriamente dita que pode causar grandes danos a estruturas vizinhas.

Para que um solo possa exibir expansividade, são necessários dois requisitos fundamentais: a) devem existir e entrarem em funcionamento certos mecanismos que, em nível microescalar, produzam a instabilidade volumétrica do solo; b) devem estar presentes forças capazes de transferirem a umidade de um ponto a outro do solo. Isso implica um desequilíbrio da umidade natural do contorno. Esses requisitos podem ser classificados em intrínsecos e extrínsecos. Os intrínsecos são próprios do solo (composição mineralógica e textura) e estabelecem a capacidade expansiva teórica; os extrínsecos são impostos por fatores externos, tais como a climatologia, hidrogeologia, vegetação e a própria atuação humana, e determinam se o potencial expansivo pode ou não se desenvolver.

Para que se manifeste o potencial expansivo por meio da mudança de umidade do solo, destacam-se dois grandes grupos de alterações: a) mudanças sazonais e b) modificações da umidade natural do terreno, pela ação humana. As mudanças sazonais estão vinculadas às variações climáticas ao longo do ano e sofrem influência do antropismo. As oscilações periódicas de umidade, na superfície do terreno, dependem da relação no binômio precipitação e evaporação (Figura 12). Como a evaporação se realiza, com frequência, por meio da atividade da biomassa, utiliza-se o termo "evapotranspiração". Cabe salientar que, além desse balanço hídrico, ainda intervém na umidade do solo superficial a hidratação oriunda de fluxos de subsuperfície.

Se num período anual a precipitação excede a evapotranspiração e supera a capacidade de retenção de água intrínseca do terreno, produz-se a eliminação, por drenagem do excesso de água. Esse tipo de água, se o solo for permeável e assente sobre base impermeável, pode dar lugar a um nível freático que é, geralmente, variável ao longo do ano. As alterações sazonais de umidade do solo são, nessas condições, pouco manifestas. Caso as precipitações estejam concentradas, em determinadas estações, nos meses de seca, pode produzir-se uma

evapotranspiração não equilibrada pela contribuição natural da água. Esse déficit tende a se compensar a partir da água retida pelo terreno. A umidade perdida tenderá a ser recuperada nos períodos de chuva. O resultado final são mudanças sazonais de umidade na franja mais superficial do solo. A evapotranspiração depende da vegetação que desenvolve uma grande atividade vital, precisamente, no começo dos meses secos, contribuindo para a dessecação do terreno. Outros fatores, que a condicionam, são a umidade relativa do ar, sua velocidade e a temperatura. Embora as variações de umidade do perfil de solo abaixo da zona mais ativa (geralmente 2 m a 4 m) possam ser relativamente pequenas, dependendo da curva característica solo-água, tais variações de umidade podem ter importante impacto sobre o comportamento mecânico do solo.

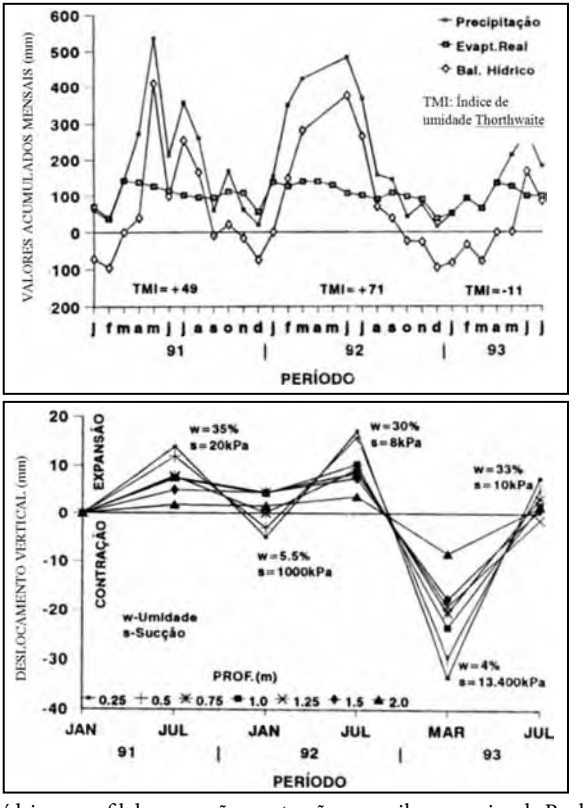


Figura 12. Balanço hídrico e perfil de expansão-contração na argila expansiva de Paulista-PE (BASTOS, 1994).

Um perfil de solo considerado expansivo, durante a infiltração de águas pluviais, pode aumentar de volume (predomínio da expansão) ou diminuir (predomínio do colapso). Se a tensão atuante é menor que a "pressão de expansão", ele aumenta de volume; se a tensão atuante é maior, sofre redução (Figura 13). Independentemente de o solo sofrer expansão ou colapso no processo de infiltração, a estrutura de engenharia, que está apoiada no solo, pode fissurar, como ilustra a Figura 14. Quando a água sai dos vazios, o solo geralmente contrai, podendo gerar o selamento das fissuras ou simplesmente ampliá-las.

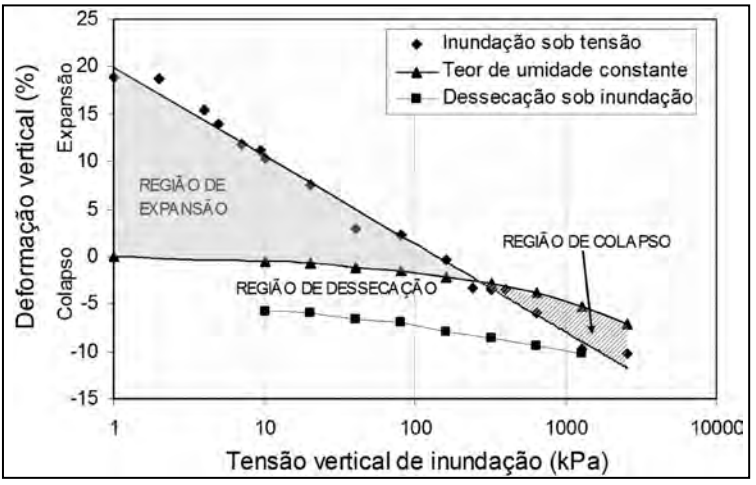


Figura 13. Variação de volume (expansão, colapso ou contração) de um vertissolo de Petrolândia (FERREIRA e FERREIRA, 2009).

Para avaliação da expansibilidade do solo em laboratório, existem várias técnicas de ensaio oedométrico. As mais comuns são a da expansão livre e o ensaio de volume constante. Ao usar o ensaio oedométrico, deve-se buscar simular o que ocorrerá no campo, lembrando que, embora o ensaio possa ser realizado seguindo-se diferentes metodologias, o comportamento medido pode ser afetado pela trajetória de tensões seguida. Embora o ensaio oedométrico seja um ensaio tipicamente K_0, como a sucção e a relação de tensões principais mudam com a hidratação, esse valor de K_0 também se alterará, intervindo diretamente no resultado.

A edificação de obras de engenharia em solos que apresentam instabilidade volumétrica, quando umedecidos, pode causar sérios problemas. Em solos expansivos, observam-se em campo, dentre outro, fissuras ou fendas características de expansão ou recalque, sendo comuns as fissuras diagonais embaixo das janelas e acima das portas das edificações (Figura 14), ondulações, trincas e degradações generalizadas nos pavimentos (Figura 15).

Existem indicações de que o grande número de fissuras finas é característico das argilas, com predominância de carbonatos de sódio livres, enquanto o número menor de fissuras maiores é de argilas, com predominância de carbonatos de cálcio livres (AHMAD, 1983). No vertissolo de Petrolândia-PE, predominam carbonatos de cálcio livres sobre os de sódio (FERREIRA, 1995), apresentando, assim, um número menor de fissuras maiores. No período de observação em campo, verificaram-se fissuras cujas espessuras variaram de poucos milímetros até 120 mm, atingindo a profundidade de 2,0 m.

Para a penetração da água, as fissuras mais largas são de maior importância do que uma grande intensidade de fissuras finas, porque, com o aumento da umidade, o solo expande e as fissuras menores são progressivamente fechadas, enquanto as maiores podem permanecer abertas por um período mais longo de tempo. Além disso, as fissuras mais largas tendem a ser mais profundas. No início do processo de umedecimento, a densidade do fissuramento é tão importante quanto a largura e profundidade das fissuras individuais. Com as chuvas, o solo absorve água, a partir, da superfície e do interior das fissuras e a massa do solo torna-se mais

g) Edificação em Petrolândia - PE. h) Edificação em Cabrobó - PE.

Figura 14. Linhas de fendilhamento em edificações de baixa altura de forma esquemática a), b) e c) e em edificações reais devido à infiltração d'água d) e e).

(a) (b)

Figura 15. Danos em pavimentos por solos expansivos: a) trincas transversais a partir do bordo da via; b) deterioração generalizada da estrutura de revestimento, em Urucu - AM.

plástica, com as partículas de argilas em processo de expansão, sendo comum o aparecimento de microrrelevos. Com o fissuramento generalizado, a superfície do terreno passa a ser constituído de blocos de solos de formas irregulares. A título ilustrativo, em uma área de 100 m^2, escolhida de forma aleatória, foram detectados em campo cerca de 190 blocos, tendo, cada um, área média de 0,53 m^2 (Figura 16a).

Observou-se, nesse mesmo local, que uma única chuva foi suficiente para causar o desaparecimento completo de algumas fissuras na superfície (Figura 16b). A umidade do solo, medida da superfície até a profundidade de 3,5 m, variou, no período seco, entre 14,5% e

21,0% e, no período chuvoso, de 42,0% a 20,9 %. A partir de 2,50 m de profundidade, praticamente não houve, nos dois anos de observação, mudança do teor de umidade do solo entre o período seco e o chuvoso, indicando ser essa profundidade o limite da Zona Ativa de mudança do teor de umidade (Figura 16c) e, também, de mudança de tensão de expansão (Figura 16d e 16e).

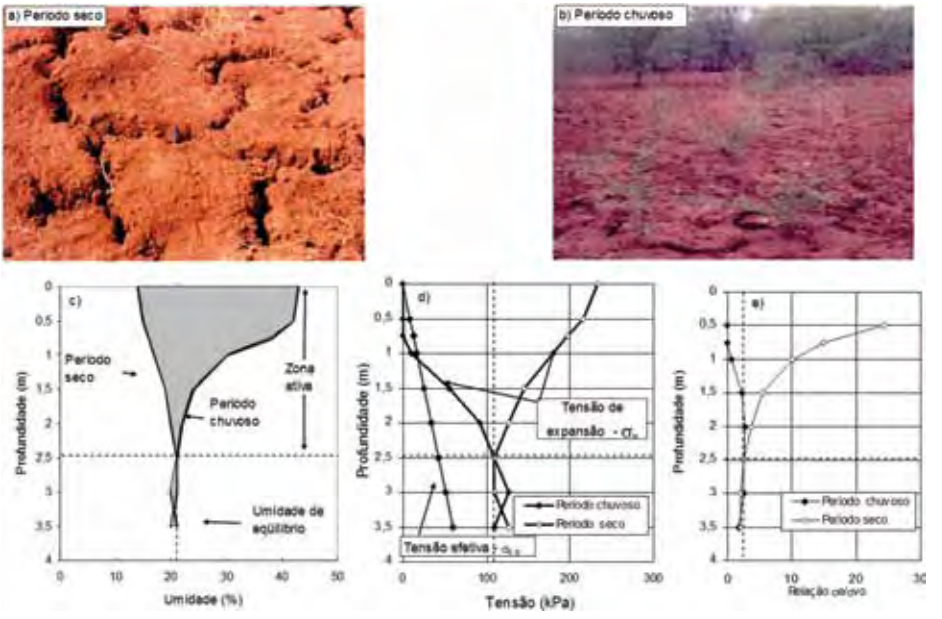


Figura 16. Expansão em campo: a) fissuras e microrrelevos em período seco; b) fissuras e microrrelevos em período chuvoso; c) zona ativa; d) tensões das terras e de expansão; e) razão entre tensões das terras e de expansão, em vertissolo de Petrolândia-PE (FERREIRA e FERREIRA , 2009).

Da Silva (2001) observou que, durante os meses de seca, com chuvas escassas, a vegetação praticamente desaparece e as fissuras superficiais intensificam, desaparecendo a uma profundidade de 2,5 m. Nessa profundidade, no período mais seco, a umidade natural torna-se maior que a umidade correspondente ao limite de plasticidade, e o solo encontra-se no estado plástico. Essa é a espessura do solo exposta ao efeito de contração e expansão. Os valores do Índice de Resistência à Penetração do solo ($N_{SPT,}$ golpes/0,3 m), medidos da superfície até a profundidade de 4,5 m, variaram, no período seco, entre 16 golpes/0,3 m a 5 golpes/0,3 m e, no período chuvoso, entre 5 golpes / 0,3 m a 16 golpes/0,3 m (JUCÁ *et al.*, 1997), Figura 17a e 17b. A partir de 3,0 m de profundidade, praticamente não houve variação nos valores do N_{SPT} entre o período seco e o chuvoso. A umidade do solo, medida da superfície até a profundidade de 4,0 m, variou no período seco entre 10% e 43% e, no período chuvoso, de 33% a 47%. A partir de 3,0 m de profundidade, praticamente não houve, nos dois anos de observação, variação do teor de umidade do solo entre o período seco e o chuvoso, indicando ser essa a profundidade limite da Zona Ativa de mudança do teor de umidade (Figura 17c) e, também, da variação de sucção e do deslocamento (Figura 17d e 17e). No período de observação de 1998 a 2000, o solo apresentou-se mais contráctil do que expansivo, conforme Figura 16e (DA SILVA, 2001).

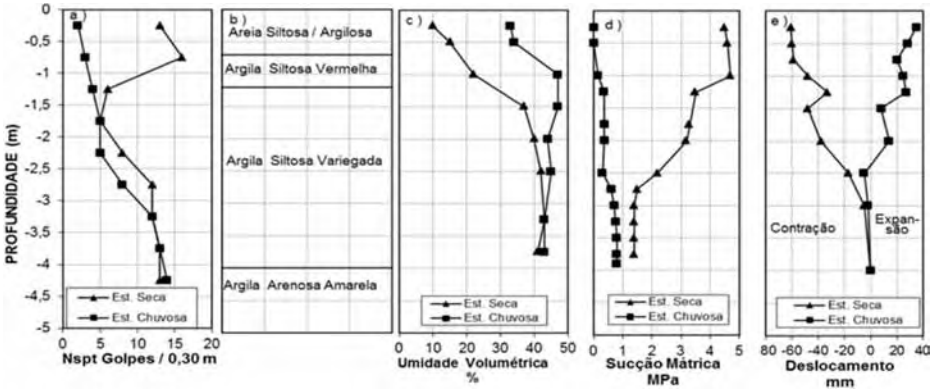


Figura 17. Influência do clima: a) N_{SPT}; b) Camada do solo; c) Umidade Volumétrica; d) Sucção Mátrica; e) Deslocamento (adaptado de BASTOS, 1994; JUCÁ *et al.*, 1997; DA SILVA, 2001).

Na argila expansiva de Petrolândia-PE, as curvas de deformação *versus* tempo, após inundação, correspondentes às tensões verticais de consolidação 160, 240, 400 e 640 kPa são mostradas na Figura 18. Verifica-se que, após a inundação na tensão de consolidação 160 kPa, o valor medido da deformação do solo é de expansão, desde o início do processo até a estabilização final das deformações. Na tensão de 640 kPa, só é medida deformação de compressão. Nas tensões de 240 e 400 kPa, após a inundação, o solo inicialmente comprime até 8 minutos e, em seguida, expande até 240 minutos, para depois comprimir até a estabilização das deformações.

Os processos de deformação de expansão e compressão podem ocorrer simultaneamente no solo. É medida, nos ensaios, a deformação resultante, que é função interna da mineralogia e sucção atuante, inicial e externamente, do estado de tensão a que se encontra submetido o solo antes da inundação. Assim, para um determinado estado de tensão, a deformação de-

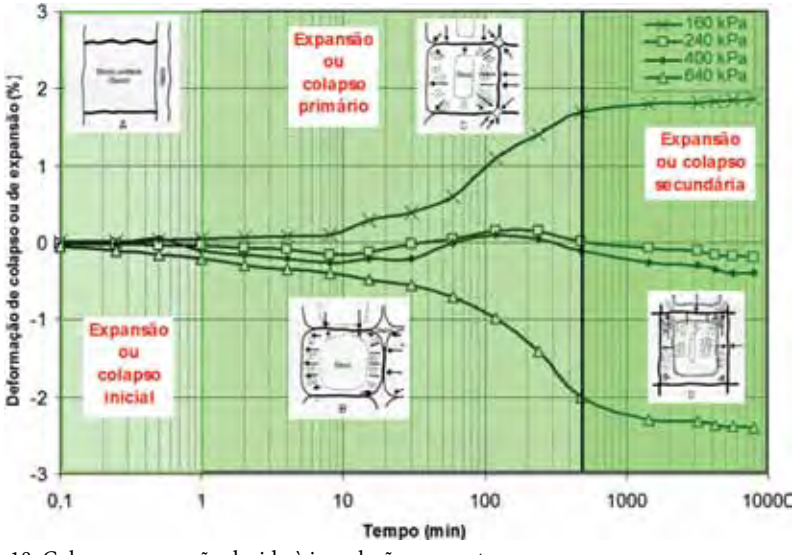


Figura 18. Colapso e expansão devido à inundação com o tempo.

corrente da inundação, medida com o tempo em um solo mineralogicamente e/ou estruturalmente expansivo, pode ser só de expansão (por exemplo, tensões inferiores a 160 kPa), expansão e compressão (240 e 400 kPa) ou só de compressão (tensões superiores a 640 kPa). Nesse processo ocorrem: expansão ou compressão inicial e variações volumétricas primárias ou secundárias (Figura 18).

6 Considerações finais

Foi apresentada, neste capítulo, uma visão geral dos principais aspectos de comportamento mecânico de solos não saturados quando submetidos à infiltração. A infiltração de água no solo produz variações no estado do solo, que podem ter impactos importantes em estruturas vizinhas. Torna-se relevante, portanto, o entendimento das consequências do processo de infiltração na variação de resistência ao cisalhamento e nas variações de volume do solo.

Foram inicialmente apresentados conceitos gerais sobre solos não saturados, tais como definições, estado de tensão e continuidade das fases. A continuidade das fases do solo foi descrita com atenção, e sua dependência com relação ao grau de saturação e textura do solo foi discutida.

Em seguida, foram discutidos aspectos relativos à resistência ao cisalhamento do solo não saturado. Foram apresentados padrões de comportamento típicos e apresentadas formulações disponíveis para a modelagem do comportamento do solo. Particularidades associadas aos solos tropicais foram abordadas.

Finalmente, foi abordado o comportamento volumétrico de solos colapsíveis e expansivos. Foram descritos os principais fatores que controlam o comportamento desses solos e as alternativas de ensaios para avaliação do seu comportamento. O impacto da infiltração no colapso e na expansão de estruturas vizinhas foi também discutido.

Portanto, a implantação de sistemas de infiltração deve sempre passar por estudos que avaliem o impacto das variações de umidade no comportamento do solo, em especial em relação à capacidade de suporte do solo e ao risco de desencadear fenômenos como os de colapso e expansão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à FAP-DF e à CAPES o suporte financeiro no desenvolvimento das pesquisas citadas neste capítulo.

Referências bibliográficas

AHMAD, N. (1983). Vertisols reprinted from pedogenesis and soil taxonomy. Vol II. *In*: The Soil Orders. WILDINY, N. E.; SMECK, G. F. (Ed.). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V. p. 91-123.

ALONSO, E. E.; GENS, A; JOSA, A. (1990). A constitutive model for partly saturated soil. Géotechnique, v. 40, n. 3, p. 405-430.

ARAKI, M. S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal. Brasília, DF: UnB. 113 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília.

BASTOS, E. G. (1994). Variação de volume de uma argila expansiva do litoral norte de Pernambuco. Campina Grande, PB: UFPB, 159 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1985). Étude du comportament mécanique d'une marne compactée. Toulouse: INSA. 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, França.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2004). Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5, 25 a 27 de agosto de 2004, São Carlos. Anais... São Carlos: ABMS. v. 2, p. 597-616.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N. (2005). Considerações sobre parâmetros de resistência de solos tropicais. *In*: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 2, 27 a 29 de outubro de 2005, Goiânia, GO. Anais... Goiânia: UFG. v. 1, p. 183-191.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C. (2002). Enffondrement de sols tropicaux. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3, 10 a 13 de março de 2002, Recife. Anais... Recife: ABMS/ISSMGE. v. 2, p. 851-856.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PEREIRA, J. H. F. (2002). Une approche pour la description des propriétés des sols non saturés. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3, 10 a 13 de março de 2002, Recife. Anais... Recife: ABMS/ISSMGE. v. 2, p. 501-506.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; NUNES, P. M.; BERBERIAM, D.; FERREIRA, E. S. (1987). Influencia del pH del líquido de saturación en la colapsabilidad. *In*: CONFERENCIA PANAMERICANA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA DE FUNDACIONES**,** 8, agosto de 1987, Cartagena. Actas... Cartagena, Colombia: Balkema. v. 2, p. 1-8.

DA SILVA, J. M. J (2001). Variação volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas. São Paulo: USP. 249 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

DONALD, I. B. (1956). Shear strength measurenments in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures. *In*: AUSTRALIA-NEW ZEALAND CONF. SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENG, 2, Christchurch. Proceedings... . v. 1, p. 200-205.

ESCARIO, V. (1980). Suction controlled penetration and shear tests. *In*: INT. CONF. EXPANSIVE SOILS, 4, 16 a 18 de junho de 1980, Denver. Proceedings... Denver, EUA: ASCE. v. 2, p. 781-797.

ESCARIO, V.; SÁEZ, J. (1986). The shear strength of partly saturated soils. Géotechnique, v. 36, n. 3, p. 453-456.

FERREIRA, S. R. M. (1995). Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação. Rio de Janeiro: UFRJ. 379 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Coppe – Instituto Alberto

Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. ,

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. (2009). Mudanças de volume devido à variação do teor de umidade em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 779-791.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soil. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons. 517p.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, v. 15, n. 3, p. 313-321.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D. (1996). The relationship of the unsaturated shear strength to the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v. 33, n. 3, p. 440-448.

GAN, J. K. M. (1986). Direct shear strength testing of unsaturated soils. 587 fl. Dissertação (Mestrado), Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canadá.

GITIRANA JR., G. F. N.; PEIXOTO, R. J.; PEREIRA, J. H. F.; BEZERRA, L. M. (2001). Mechanical behaviour model for the collapsible clay of Brasilia. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 4, 22 a 23 de março de 2001, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABMS. v. 1, p. 11-28.

JUCÁ, J. F. T.; FERREIRA, R. N.; BASTOS, E. G.; DA SILVA, J. M J. (1997). Comportamento geotécnico de uma argila expansiva não saturada. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3, 21 a 25 de abril de 1997, Rio de Janeiro. Anais… Rio de Janeiro: Frei Bastos Editora. v. 1, p. 145-150.

LAMBE, T. W. (1960). The character and identification of expansive soils. Federal Housing on Report FHA – 701, Washington, DC.

MASCARENHA, M. M. A. (2008). Influência da microestrutura no comportamento hidro-mecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações. Brasília, DF: UnB. 158 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília. Publicação G.TD-056/08.

VALÊNCIA, Y. G.; FARIAS, M. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CORDÃO NETO, M. P. (2007). Determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura em solos não saturados a partir de diversos ensaios simples de laboratório. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6, 1 a 3 de novembro de 2007, Salvador. Anais... Salvador: ABMS. v. 1, p. 339-342.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E.; CLIFTON, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 33, n. 3, p. 379-392.

VARGAS, M. (1977). Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill. 509 p.

VILAR, O.M. (2006). A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 43, n. 10, p. 1088-1095.

Capítulo 10
Análises de cenários de suscetibilidade a inundações e alagamentos

Pedro Henrique Lopes Batista
Andrelisa Santos de Jesus
Marianna Jacominy de Amorim Mendes
Newton Moreira de Souza
José Camapum de Carvalho

1 Introdução

As inundações são geradas por precipitações intensas que excedem a capacidade de infiltração do solo e resulta, devido a incapacidade de rios e canais suportarem a vazão na sua calha de drenagem, no transbordamento e na consequente inundação das áreas marginais (TUCCI, 2004a). Conforme Tucci (2004a), os impactos das inundações nas áreas ribeirinhas dependem do grau de ocupação da várzea e da frequência de ocorrência das inundações. Assim, segundo o mesmo autor, a população busca a ocupação de zonas altas, que são imunes à extensão das cheias. Todavia, o crescimento desordenado e a urbanização acelerada nas últimas décadas foi fator considerável para a ocupação em áreas suscetíveis a inundação.

Para melhor entendimento dos alagamentos e das inundações em áreas urbanas, selecionou-se para estudo a cidade de Anápolis, por tratar-se de localidade que se encontra em franco desenvolvimento e é muito afetada por esses processos, bem como pelos processos erosivos de origem antrópica. Acredita-se que a metodologia de análise aqui apresentada, com alguns ajustes relativos ao contexto socioambiental, aqui se incluindo os relativos ao meio físico, pode ser utilizada no estudo do problema dos alagamentos e inundações em outras cidades brasileiras.

Guerra e Guerra (2006) citam que os termos alagado e inundado são sinônimos. Alagada é uma área inundada após uma enchente; os terrenos denominados de alagadiços são aqueles encharcados e sujeitos a inundações, periodicamente, por rios ou marés, podendo tornar-se uma área seca. Já a enchente é decorrente de grandes chuvas, provocando desastres, além de serem temporalmente irregulares.

Entretanto, Souza (2004) menciona, de uma forma geral, que a inundação é resultado do transbordamento da hidrografia de uma região, diferentemente dos processos de alagamento que ocorrem em "áreas distantes dos canais, em terrenos com ocupação antrópica e baixo coeficiente de escoamento superficial", caracterizado por fluxos de baixa velocidade.

Para Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), a inundação é o extravasamento das águas de uma calha de um rio, quando a vazão é superior à capacidade de suporte do escoamento. Ainda, conforme os mesmos autores, é um processo associado a enchentes, que é o acréscimo na descarga de fluxo por um intervalo de tempo, ou cheias, que se referem às maiores vazões diárias sucedidas em cada ano, independentemente de poder causar processos de inundação.

O termo planície de inundação, popularmente chamada de várzea, define uma área de deposição de carga detrítica, devido à diminuição da competência ou capacidade fluvial. É a área de borda dos cursos de água da faixa do vale fluvial composta por sedimentos aluviais, que é inundada periodicamente por transbordamentos dos canais. Essa é a forma mais comum de sedimentação fluvial existente. Também podem ser citados os deltas, cones de dejeção, as *playas* e *bahadas* e as restingas fluviais, encontrados em rios de todas as dimensões. A planície de inundação é formada pelos aluviões e materiais depositados (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Segundo a *Emergency Events Database* (EM-DAT, 2011), na América do Sul, somente no ano de 2010, foram registradas 11 inundações. Cerca de 30% desse valor corresponde apenas aos eventos registrados no Brasil. Ainda segundo a mesma base de dados, 37 inundações foram verificadas entre 2000 e 2010 no Brasil. Apenas no ano de 2010, mais de 230 mil pessoas foram afetadas no País.

Todavia, tais números podem ser muito maiores, dados os critérios dos bancos de dados de desastres naturais globais e regionais, de acordo com a comparação realizada por Marcelino *et al.* (2006) entre os dados do EM-DAT e do Departamento de Estado de Defesa Civil de Santa Catarina (DESC-SC). Tanto em escala global (EM-DAT) quanto em escala regional (DESC-SC), cerca de 60% dos casos de desastres naturais são inundações. Porém, uma série de erros na omissão e inserção de dados e tipologia e na quantificação de danos foi verificada.

Segundo Guha-Sapir e Lechat (1986), as inundações podem ter ambiguidades nas características do tempo de latência. São eventos quase sempre de lento desenvolvimento e bastante previsíveis. Além disso, podem causar menor mortalidade, em relação a outros eventos catastróficos. Inundações acompanhadas de tsunamis ou ciclones são catastróficas.

Perante os conceitos expostos, a municipalidade de Anápolis (GO) não tem lidado apenas com "conceitos", mas com a realidade dos fenômenos geomorfológicos e hidrológicos. Cidade criada em 1907, nascida do desbravamento das terras goianas, devido à combinação de duas principais atividades: de mineração e as agrícolas. Atualmente, segundo registro do censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Anápolis possui 335.032 habitantes; 98% dessa população é urbana e ocupa uma área de cerca de 900 km² (Figura 1). Conforme Jesus (2007), esse aumento populacional foi sentido a partir da década de 1970, quando a população urbana passou a ser superior à rural, com 105.121 habitantes, e em 2000, já com a cifra de 287.666 habitantes.

Esse crescimento populacional e urbano sem o devido planejamento é citado por Souza e Teixeira (2003), que realizaram a identificação temporal e espacial das inundações fluviais e pluviais na área urbana de Anápolis, por meio de inventários da imprensa e dos registros do Corpo de Bombeiro Militar de Anápolis. A partir do ano de 2001 até março de 2003, foram registradas 33 inundações e alagamentos. Os locais de maior concentração desses eventos foram o rio das Antas, o córrego dos Góis, o córrego Água Fria, o ribeirão Extrema e o córrego dos Cesários e o centro da cidade.

Os bairros frequentemente comprometidos com os eventos de inundação são Vila Góis, Jardim das Américas, Bairro São Joaquim e o centro da cidade, principalmente a Avenida Brasil Sul, Avenida Universitária e a Avenida Contorno. A Avenida Brasil Sul, que corta a cidade passando no centro, devido à sua proximidade das unidades hídricas das Antas e Góis, drenagens canalizadas localizadas em uma planície de inundação (fundo de vale) densamente povoada, sofre constantes inundações. Outros fatores são a declividade do terreno e a estru-

tura inadequada e insuficiente da rede de drenagem pluvial, que favorecem o escoamento superficial, danificando construções e edificações e colocando em risco a população (SOUZA e TEIXEIRA, 2003).

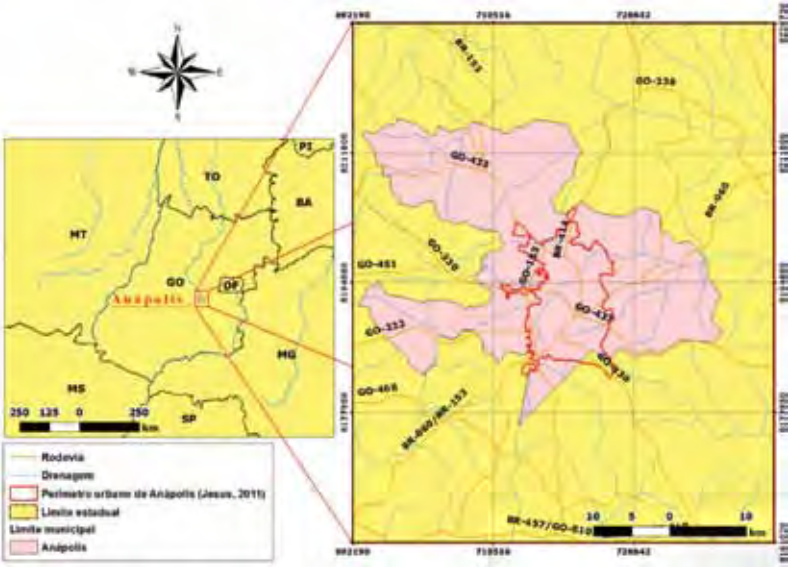


Figura 1. Localização de Anápolis/GO e seu perímetro urbano como unidade de planejamento.

Em um trabalho semelhante ao anteriormente citado (SOUZA e TEIXEIRA, 2003), Teixeira *et al.* (2004) concluem que os acidentes hidrológicos estão associados à forma de uso do solo, ao se implantar uma infraestrutura urbana desconsiderando os processos geomorfológicos, como, por exemplo, o parcelamento do solo em áreas de planície de inundação, além do estrangulamento das drenagens, por meio de aterros, pontes e outras construções. Também é importante lembrar que o mau uso do solo a montante das drenagens, com impermeabilizações excessivas e sem destinação apropriada às águas pluviais, potencializa as vazões de pico e, consequentemente, os processos de inundação.

Oliveira *et al.* (2004) citam a microbacia do córrego Cesários, localizada na porção centro-norte da área urbana de Anápolis, como um exemplo dos fatores de urbanização correlacionados com a inundação. O aumento do escoamento superficial causa o aparecimento de sulcos e ravinas em vias pavimentadas e voçorocas nas cabeceiras de drenagem.

Praticamente todas as drenagens na área central de Anápolis são atingidas por inundações. Em vista disso, Lacerda *et al.* (2004) delimitaram as áreas com predominância de inundação fluvial e alagamentos: o rio das Antas e seus afluentes (córrego dos Góis e Cesários); o bairro Anápolis City, ao longo de todo córrego Água Fria, e a Matinha.

Para o melhor entendimento do cenário das inundações recorrentes em Anápolis e do desenvolvimento urbano da cidade, são valiosas as abordagens fazendo uso de ferramentas de geoprocessamento para identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de inundações considerando-se o perímetro urbano de Anápolis como alvo (JESUS, 2011). Isso permite sistematizarem-se todos os mapeamentos realizados anteriormente e alinhar-se a tomada de decisão quanto aos perigos de inundações e alagamentos existentes.

A seguir será apresentada uma metodologia para a construção de cenários passíveis de inundação com base em atributos do meio físico e do uso do solo. Os dados ora apresentados fazem parte da pesquisa defendida como trabalho de conclusão do curso de Engenharia Ambiental na Universidade Católica de Brasília (UCB), intitulado "Geoprocessamento aplicado aos processos de inundação em Anápolis/GO" pelo primeiro autor e está vinculado à tese de Doutorado, em desenvolvimento, intitulada "Processos erosivos em Anápolis (GO): diagnóstico, medidas mitigadoras e prevenção" da segunda autora. O estudo faz parte do Projeto Pronex "Estruturas de infiltração da água da chuva como meio de prevenção de inundações e erosões", financiado pelo Fundo de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Esse projeto está sendo desenvolvido pela Universidade de Brasília, instituição executora, e pela Universidade Federal de Goiás, instituição participante. O projeto conta ainda com o apoio do Instituto Geotécnico de Reabilitação do Sistema Encosta-Planície – REAGEO (INCT CNPq/FAPERJ).

2 Construção dos cenários de áreas passíveis de inundação

Os cenários de áreas passíveis de inundação devem ser construídos levando-se em conta as características socioambientais regionais conjugadas a avaliação do risco, mesmo que qualitativa. No presente caso, os cenários foram construídos com auxílio de banco de dados elaborado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) programa Spring 5.7.1 (CÂMARA *et al.*, 1996) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), armazenando as informações que servem de atributos para utilização no modelo. Para procedimentos específicos, também foi utilizado o programa ArcGIS 9.3 da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Foram realizadas diversas rotinas de geoprocessamento para construção do banco de dados e informações mapeadas, já processadas, por Jesus (2011).

2.1 Atributos do meio físico

Os atributos do meio físico adotados para construção do modelo e cenários de inundação são: os morfométricos, que consistem na hipsometria e declividade do terreno (clinografia); os hidrológicos, que são a área de fluxo acumulado e a distância de drenagem (mapa de distâncias ou *buffer*), e as áreas impermeabilizadas, derivadas de mapeamento do uso e cobertura do solo no ano de 2010. Nesse contexto, o potencial de inundação pode ser definido pela Equação 1:

$$Inundação = f(\text{declividade, hipsometria, fluxo acumulado, distância de drenagem, uso e cobertura}) \quad (1)$$

Nessa equação, a questão social insere-se no atributo uso e cobertura. É preciso ter em mente que, no que diz respeito aos riscos, a parte da sociedade com menor poder aquisitivo ocupa as áreas mais críticas, enquanto no que se refere à origem dos problemas a responsabilidade recai no tecido social como um todo, pois se trata de um problema de origem cultural e educacional. Destaca-se que, neste caso, a educação necessária não diz respeito à titulação

acadêmica, mas, sim, à construção de valores éticos, morais e de cidadania, aquela formação que confere ao indivíduo um traço cultural voltado para o respeito à vida e que valoriza a sua qualidade no contexto ambiental e na relação com os demais indivíduos.

Existem condições hidrológicas naturais e artificiais de produção da inundação, relacionadas diretamente com o escoamento superficial, que dependem de diversos atributos e embasam as escolhas declaradas anteriormente (Equação 1). As condições naturais (relevo, declividade, densidade da rede de drenagem, quantidade de fluxo de água e altimetria) e as condições artificiais (provocadas pelas ações humanas em obras hidráulicas, urbanização, desmatamento, reflorestamento e uso agrícola) das bacias hidrográficas estão relacionadas com os atributos adotados (Equação 1) para a produção de inundações.

O relevo tem diversos atributos de análise morfométrica linear e espacial das bacias hidrográficas, dos quais se podem destacar a declividade e altimetria, utilizados no presente estudo. Quanto maior for a declividade (Equação 1) das encostas da bacia ou de um trecho do curso de água, maiores serão as velocidades de escoamento e os picos de vazão, com pouco escoamento de base. Considera-se, ainda, que grandes declividades também aumentam a dificuldade de infiltração, ampliando-se, assim, a disponibilidade de águas pluviais para os processos de inundação e/ou alagamento. As cabeceiras das bacias hidrográficas, que se situam em condições de alta declividade ou na base de encostas, apresentam essas características, favorecendo, quando desprotegidas, o surgimento de fenômenos como os de erosão e de excesso de fluxo no canal, promovendo o seu transbordamento.

A ocupação humana geralmente se estende a áreas planas e mais baixas, as quais são áreas de alto risco de inundação, pois se referem a ambientes de planícies, também conhecidos como várzeas (TUCCI, 2004a), onde as inundações naturalmente fazem parte da geomorfologia fluvial.

Outro aspecto é a densidade da rede de drenagem: quanto maior for a densidade de drenagem, mais montanhosa é a bacia e sugere maior quantidade de escoamento superficial, devido à dificuldade de infiltração e às condições mais favoráveis ao fluxo, induzindo altos picos no hidrograma unitário. Esse efeito pode ser anulado pela capacidade de um grande volume de água ser escoado pelos canais (PINTO *et al.*, 2000). A densidade da rede de drenagem influencia, também, os atributos da área de fluxo acumulado e a distância de drenagem (Equação 1).

A influência da cobertura do solo da bacia hidrográfica na contribuição para os processos de inundação pode ser verificada pelo atributo de uso e cobertura do solo (Equação 1). As bacias que têm os terrenos com maior área vegetada interceptam eficientemente o escoamento superficial e a precipitação, havendo, como consequência, maior transferência de água para a atmosfera por evapotranspiração e maior infiltração de água no solo. As bacias rurais, quando vegetadas, apresentam maior interceptação da água, proporcionando menor escoamento superficial no terreno e drenagem mais lenta da água. No entanto, a falta da cobertura vegetal surte efeitos contrários a esses. Já as bacias urbanas possuem grandes áreas impermeabilizadas por telhados, pisos, calçadas, ruas e avenidas, o que produz não só a ampliação do volume de água a ser drenado, como também o aumento da velocidade do escoamento superficial e nas drenagens (PINTO *et al.*, 2000; TUCCI, 2004b). Tais fatores implicam a elevação da vazão máxima, crescendo a tendência para ocorrência de cheias, enchentes, alagamentos e inundações

Segundo Guerra e Guerra (2006), a permeabilidade é a "propriedade das rochas e dos solos de se deixarem atravessar pela água de infiltração", ou seja, "transmitir a água pelos poros ou interstícios". Portanto, para esclarecer o fenômeno da permeabilidade aqui tratado, é necessária a distinção do processo de infiltração, que é entendido, segundo Silveira *et al.* (2004), como "a passagem de água da superfície para o interior do solo", ou seja, é a água que entra no solo. Segundo Das (2007), a permeabilidade é função da interconexão dos poros do solo onde ocorre o fluxo de água, devido à diferença de energia hidráulica. No entanto, há que se considerar diferentes aspectos relativos ao meio, ao estado físico do solo e às propriedades químico-mineralógicas e físicas do solo. Assim, por exemplo, solos com mesma porosidade, mas com composição químico-mineralógica distinta, vão apresentar permeabilidades distintas e, portanto, capacidades de infiltração também distintas. Ao mesmo tempo, solos em que tudo isso é igual, mas cujas distribuições de poros sejam diferentes, apresentarão também capacidades de infiltração distintas. Considerando, ainda, que tudo isso seja igual (porosidade, distribuição dos poros e propriedades químico-mineralógicas e físicas), ainda assim a capacidade de infiltração variará com o estado físico em que se encontra o solo, estrutura e grau de saturação. Graus de saturação baixos (à esquerda da linha da umidade ótima das curvas de compactação) proporcionam, geralmente, rápida infiltração na fase inicial devido à elevada sucção/capilaridade a que está submetido o solo. No entanto, a fase ar sem possibilidade de evacuar-se impedirá a continuidade do processo de infiltração. Por isso, são importantes não só a intensidade da chuva e do seu somatório, como também a sua distribuição, pois esta é diretamente responsável pelo grau de saturação de equilíbrio a cada momento.

A utilização do atributo de distância de drenagem (Equação 1) é dependente das características dos rios, que podem se comportar em função das propriedades dos diversos leitos fluviais: (i) um leito menor, que é bem delimitado e encaixado, com maior quantidade de escoamento; (ii) um leito de vazante, que está encaixado no leito menor na sua maior profundidade, funcionando em épocas de seca, e (iii) o leito maior, ocupado durante as cheias e denominado planície de inundação, variando conforme a intensidade da cheia (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998). A delimitação desses leitos depende da cota altimétrica de inundação, conforme a frequência de ocorrência das enchentes. Os leitos ou as áreas de escoamento concentrado que o rio pode ocupar devem ser definidos. O menor ou médio leito corresponde aos regimes de baixo escoamento, estiagem e seca. O leito maior depende da seção transversal analisada e da topografia da planície de inundação. A seção de escoamento, segundo Tucci (2004a), pode ser definida como: (i) zona de passagem da enchente, que funciona hidraulicamente para o amortecimento e a passagem da enchente; (ii) zona com restrições, que é de pouca contribuição para o fluxo da enchente, ficando inundada com pequenas profundidades e baixas velocidades, e (iii) a zona de baixo risco, que é uma área que não necessita de regulamentações em relação às cheias, pois é pequena a probabilidade de ocorrência de inundações nessa faixa. Essas zonas e leitos podem compor, portanto, cenários a serem analisados quanto ao risco, à suscetibilidade e à vulnerabilidade de inundação.

Pode-se fazer um paralelo entre essas zonas ou seções de escoamento em canais abordado na definição quantitativa do Código Florestal (Lei nº 4.771/1965) e da Resolução Conama nº 303/2002. De acordo com as diversas larguras das unidades hídricas, as legislações definem os limites (*buffers*) para as áreas de preservação permanente (APP) de: 30, 50, 100, 200 e 500 m, para larguras dos canais de até 10, entre 10 e 50, entre 50 e 200, entre 200 e

600 e superior a 600 m, respectivamente. Cabe salientar que, na data de elaboração deste estudo, já foi aprovado no Senado Federal o Projeto de Lei da Câmara (PLC) nº 30/2011, que define o texto do novo Código Florestal Brasileiro cuja delimitação das áreas de preservação permanente ainda segue, em grande parte, a lei em vigor, principalmente em relação à definição quantitativa das faixas marginais (*buffers*) ao longo de qualquer curso d'água natural, já citado nesse parágrafo.

Outro atributo utilizado foi o da área de fluxo acumulado (Equação 1), que simula o caminho preferencial da água da chuva, resultando na rede de drenagem e indicando o local (ou *pixel*) onde possa haver maior acumulação da água. Além disso, a área de fluxo acumulado é uma informação também importante para estudos de relevo, de áreas de suscetibilidade de erosão, de fluxo de contaminantes, para a delimitação de áreas inundáveis e nos estudos de bacias hidrográficas (ROSIM, 1999 citado por FRAGA *et al.*, 2003). No presente estudo de caso, a área de fluxo acumulado foi essencial para a geração das zonas suscetíveis ao escoamento (*buffer* ou distância de drenagem), pois tal atributo possibilita o reconhecimento da hidrografia da região de estudo.

Outro atributo utilizado foi a hipsometria. Em trabalho realizado em Goiânia para a verificação de inundações, Santos (2010) utiliza as informações das variações hipsométricas, nas quais é possível observar as diversas quebras de altitudes do terreno, como condicionante natural morfométrica para a produção de inundações. A autora ainda concluiu que as inundações são causadas por condicionantes naturais do meio físico e pela ocupação urbana, devido ao estrangulamento de drenagens, impermeabilizações de áreas e assoreamentos dos cursos d'água e reservatórios, o que intensifica os processos de inundação.

2.2 Uso e cobertura do solo

Almeida Filho e Almeida (2001) definem que o solo é a superfície da paisagem e o uso do solo "corresponde às intervenções do homem no meio visando atender suas necessidades agrícolas, urbanas, industriais, dentre outras". Já a ocupação é o modo de desenvolvimento do uso do solo para diversos fins (irrigação, loteamentos, etc.).

A cobertura e o uso do solo indicam a distribuição geográfica e espacial das tipologias de uso do solo, que são todas identificadas pela observação de padrões homogêneos da cobertura terrestre (IBGE, 2006). Para Lillesand e Kiefer (1994), a cobertura do solo ou da paisagem está relacionada ao tipo de feição presente na superfície da terra (plantações, lagos, árvores e estradas). O uso do solo, por sua vez, é concernente à função econômica e à atividade humana (uso residencial urbano, uso industrial).

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), esse tipo de mapeamento é fundamental para construção de cartas de risco, sendo tão melhor elaborado quanto maior a resolução e detalhe das fotos e imagens de satélites utilizadas. Os autores ressaltam que deve haver uma grande variabilidade nas categorias mapeadas, para que sejam alvos de análises de vulnerabilidade em relação a algum evento perigoso.

Para o controle da qualidade do mapeamento dos usos e cobertura dos solos, é importante ressaltar o sistema de classificação, que deve orientar as pesquisas e os estudos. Segundo o *United States Geological Survey* (*USGS*), a qualidade do mapeamento é delineada conforme

os seguintes critérios: (i) o menor nível de acurácia (exatidão), ao utilizar-se de dados de sensor remoto, deve ser de, no mínimo, 85%; (ii) os níveis de acurácia para todas as categorias mapeadas devem ser aproximados; (iii) resultados repetidos podem ser obtidos de acordo com o intérprete e/ou o sensor adotado; (iv) o sistema de classificação deve ser aplicável para áreas extensas; (v) a categorização das classes deve permitir que o uso do solo possa ser inferido a partir da cobertura do solo; (vi) o sistema de classificação deve ser adequado para a utilização em dados de sensoriamento remoto obtidos em diferentes períodos do ano (variabilidade da resolução temporal); (vii) as categorias mapeadas devem ser divisíveis em mais subcategorias para possibilitar o uso de dados de sensor de alta resolução espacial ou em pesquisas de campo; (viii) deve ser possível agregar categorias; (ix) comparações com futuros padrões de uso e cobertura do solo devem ser possibilitadas, e (x) usos múltiplos do solo devem ser reconhecidos (LILLESAND e KIEFER, 1994).

Dessa forma, foram definidas 19 classes de mapeamento para a elaboração do mapa de uso e cobertura (Tabela 1 e Figura 2). A imagem de partida para o mapeamento foi fornecido pela Prefeitura Municipal de Anápolis. A imagem é do ano de 2010, do sistema sensor *GeoEye*-1. Possui 0,5 m de resolução espacial, nas bandas: 450 a 510 nm (azul); 510 a 580 nm (verde); e 655 a 690 nm (vermelho).

O mapa de uso e cobertura foi elaborado por meio de técnicas de fotointerpretação e de análise digital quantitativa de classificação. Especificamente, a classificação supervisionada utilizada foi a da máxima verossimilhança (*MaxVer*) gaussiana. Foi utilizado também um algoritmo pelo qual são observadas as informações contextuais da classificação, dependendo do valor atribuído aos *pixels* vizinhos, em uma reclassificação, chamado de *MaxVer-ICM* (*Interated Conditional Modes*). Vários estudos e artigos (GUIMARÃES e LACERDA, 2005; JESUS, 2007; SOUTO e LACERDA, 2004; TEIXEIRA *et al.*, 2005; TEIXEIRA e ROMÃO, 2009) de grupos de pesquisa da Universidade Federal de Goiás e da Universidade Estadual de Goiás foram utilizados para direcionar a amostragem das feições na classificação supervisionada, assim como os trabalhos de campo. A reamostragem utilizada, para todos os processos do presente trabalho (importação de imagem, degradação, mosaicos, etc.), foi a do vizinho mais próximo. Para auxiliar na fotointerpretação e amostragem das feições para a classificação supervisionada, foram adotadas técnicas de realce da imagem de transformação pelas Componentes Principais (*Principal Component Transform*) e transformação *IHS* (*intensity*, *hue* e *saturation*).

O mapa de uso e cobertura do solo resultante deste estudo usando a metodologia descrita está ilustrado na Figura 3. Os procedimentos e funções adotados no mapeamento de uso e cobertura do solo, explicados anteriormente, são descritos detalhadamente no fluxograma da Figura 4.

Tabela 1. Classes de uso e cobertura do solo mapeadas e as respectivas definições adotadas.

Classe	Definição
Área Urbana Consolidada	Região urbana de alta densidade de ocupação.
Área Urbana em Consolidação	Região urbana em expansão, com densidade de ocupação de média a alta, localizada, principalmente, na periferia das áreas urbanas consolidadas.

(continuação)

Classe	Definição
Área Urbana Parcelada	Região urbana de média a baixa densidade, com início de loteamento.
Área Urbana Parcelada com Vegetação Antropizada	Região urbana com vegetação antropizada, de predominância herbácea e arbustiva, encravada e circundada na área urbana (campo antrópico).
Área Urbana Industrial	Região com atividades industriais de potencial para causar degradação ou poluição do ar, solo e água, significativa ao meio ambiente.
Área Urbana Industrial Parcelada	Região com loteamentos para a implantação de atividades industriais.
Cultivo Temporário e Perene	Plantações e cultivos anuais ou cíclicos (sofrem mudanças sazonais) e permanentes ou de longo ciclo (permitem sucessivas fases de colheita).
Pastagem	Área de vegetação rasteira, cultivada ou antropizada, para pecuária extensiva, semi-intensiva e intensiva, com espécies arbustivas e arbóreas.
Formação Florestal	Formações arbóreas em estágio evoluído de sucessão ecológica. Floresta estacional, ombrófila, dentre outras.
Formação Savânica (Cerrado)	Formação de estrato graminoso, com dossel descontínuo de árvores e arbustos espalhados.
Solo Exposto	Áreas degradadas, que perderam sua resiliência ecossistêmica, necessitando de medidas de recuperação para a estabilização do sítio. Entretanto, nem todo solo exposto é resultado de degradação antrópica direta .
Área Minerada	Áreas que sofreram os vários tipos de atividades de extração mineral (lavra, garimpo, etc.).
Aterro Sanitário	Local de disposição final de resíduos sólidos.
Estação de Tratamento de Esgoto	Infraestrutura de tratamento de águas residuais domésticas e industriais.
Cemitério	Área comumente mapeada como classe de área urbana para sepultamento de cadáveres e restos mortais.
Aeroporto	Área para atendimento de serviços de decolagem e aterrissagens de aeronaves.
Via Principal	Áreas pavimentadas que ligam e comunicam a malha urbana.
Água, Lago e Lagoa	Águas interiores passíveis de mapeamento.
Nuvem	Ar resfriado em ponto de orvalho, formando gotículas de água e gelo, que afetam a visibilidade e quantificação de feições na imagem.

Fonte: alterado de Almeida Filho e Almeida (2001), Almeida e Freitas (1996), IBGE (2006), IBGE (1992), Ribeiro e Walter (1998).

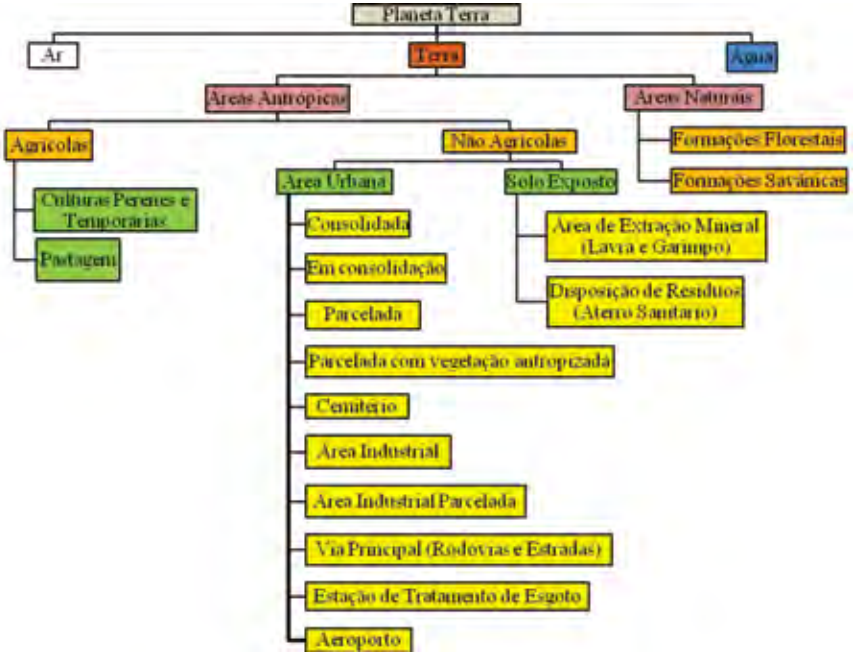


Figura 2. Nomenclatura de tipologia de uso e cobertura do solo, aplicada para o mapeamento em Anápolis, GO (modificado e baseado em Heymann, 1994, citado por IBGE, 2006).

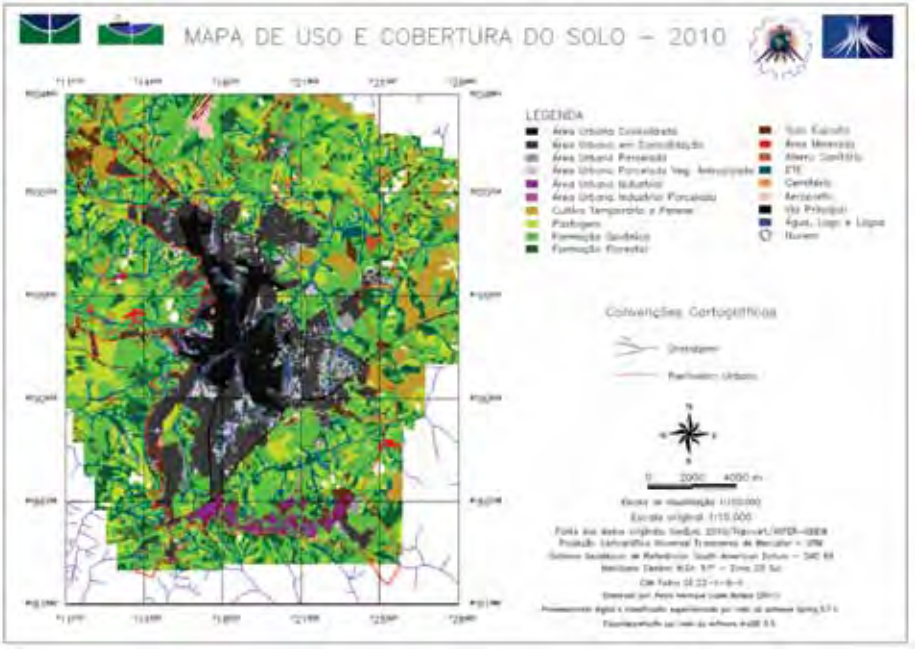


Figura 3. Mapa de uso e cobertura do solo de Anápolis, do ano de 2010.

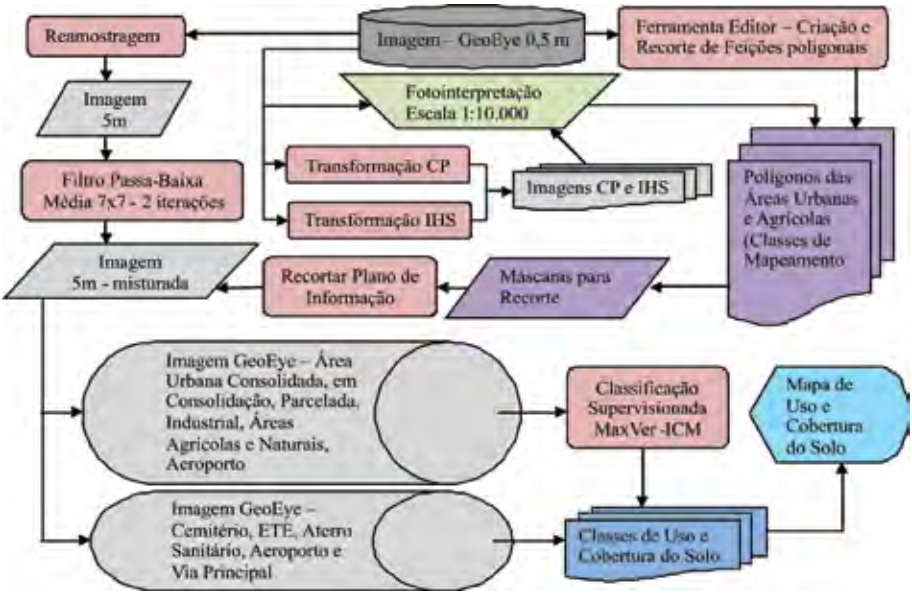

Reamostragem
Imagem – GeoEye 0,5 m
Ferramenta Editor – Criação e Recorte de Feições poligonais
Imagem 5m
Fotointerpretação Escala 1:10.000
Filtro Passa-Baixa Média 7x7 - 2 iterações
Transformação CP
Transformação IHS
Imagens CP e IHS
Polígonos das Áreas Urbanas e Agrícolas (Classes de Mapeamento
Imagem 5m - misturada
Recortar Plano de Informação
Máscaras para Recorte
Imagem GeoEye – Área Urbana Consolidada, em Consolidação, Parcelada, Industrial, Áreas Agrícolas e Naturais, Aeroporto
Classificação Supervisionada MaxVer-ICM
Mapa de Uso e Cobertura do Solo
Imagem GeoEye – Cemitério, ETE, Aterro Sanitário, Aeroporto e Via Principal
Classes de Uso e Cobertura do Solo

Figura 4. Fluxograma do processamento dos dados adotado para o Mapa de Uso e Cobertura do Solo de 2010.

2.3 Hipsometria

A hipsometria é uma característica morfométrica essencial para a busca das causas de inundação. Segundo Guerra e Guerra (2006), a hipsometria é a representação das feições de elevação topográfica do terreno, por meio das isoípsas ou curvas de nível, com referência ao nível do mar, adotando cores convencionais. O mapa de hipsometria utilizado foi obtido do trabalho de Jesus (2011) e suas classes variam entre 855 m e 1.165 m.

2.4 Declividade

O mapa clinográfico (declividade) mostra a inclinação das vertentes e encostas, podendo ter dimensão de graus ou porcentagem. Diversos autores adotam vários intervalos de classificações de declividade. O mapa clinográfico utilizado no presente estudo foi obtido de Jesus (2011), que adotou classes com intervalos de: 0 a 2%; 2 a 5%; 5 a 10%; 10 a 15%; 15 a 20%; 20 a 30%; 30 a 45% e maior que 45%.

2.5 Área de fluxo acumulado e distância de drenagem

A imagem ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Map*), de 30 m de resolução espacial, que resultou em cur-

vas de nível de 14 m de equidistância, foi mosaicado em um mesmo modelo digital de terreno com curvas de nível de 1 m de equidistância somente da área do centro urbano de Anápolis. Esse modelo digital de terreno foi a base topográfica para o cálculo das grades hidrológicas para a obtenção da grade de área de fluxo acumulado e da direção de fluxo da água, no Spring.

O fluxo depende do número de vizinhos que tenha um valor de elevação superior ao analisado, dependendo sempre da curvatura do terreno que direciona os fluxos (FRAGA *et al.*, 2003), permitindo a extração automática das redes de drenagem. Ou seja, a área de fluxo acumulado é obtida pela soma da área das células que convergem para uma dada célula.

Considerando que a porção oeste de Anápolis é uma área muito dissecada, cujas principais drenagens são o ribeirão Jenipapo e os córregos Lagoinha, Catingueiro e Barreiro, optou-se por gerar duas grades de fluxo acumulado classificadas distintamente, uma para a porção oeste e outra para a porção centro-leste, fazendo uma posterior fusão das duas grades fatiadas. Na porção oeste, a grade de fluxo acumulado foi fatiada utilizando-se as seguintes classes: de 1 a 200; de 200 a 500; de 500 a 1.000; de 1.000 a 5.000; de 5.000 a 10.000 e de 10.000 a 50.000. Na porção centro-leste, a grade hidrológica foi classificada nos seguintes valores de limiares: de 1 a 500; de 500 a 1.000; de 1.000 a 5.000; de 5.000 a 10.000; de 10.000 a 50.000; de 50.000 a 100.000 e de 100.000 a 172.633. Todas essas classificações foram obtidas a partir da grade hidrológica de área de fluxo acumulado, e os valores dimensionais desses limiares são a quantidade de células que convergem para uma célula específica.

Após a obtenção dos fatiamentos do mapa de área de fluxo acumulado, anteriormente citado, foi realizada a vetorização dos *pixels* de indicação da direção de fluxo, acima dos valores limiares de 200 e 500, para a porção oeste e a porção centro-leste, respectivamente, do perímetro urbano de Anápolis. Tal vetorização foi realizada no ambiente do programa ArcGIS, pela função *Raster to polyline* do ArcToolbox. Assim, as polilinhas, da vetorização da área de fluxo acumulado, foram consideradas como o centro das drenagens, para elaboração do mapa de distância de drenagens.

As linhas de drenagem foram então importadas para o programa Spring, em que foi confeccionado o mapa de distância de drenagem, por meio da função "Mapa de Distância", que depois foi fatiado nas categorias de: 0 a 30 m; 30 a 50 m; 50 a 100 m; 100 a 200 m e 200 a 500 m.

Quanto maiores os valores dos limiares da área de fluxo acumulado, maior é o número de células que contribuem para o fluxo. A distância de drenagem, por sua vez, indica as seções ou zonas de escoamento, conforme Tucci (2004a). Dessa forma, para classificar a tendência de quantidade de fluxo dentro das zonas de escoamento, foi realizada a operação (Equação 2) entre a grade hidrológica de área de fluxo acumulado e o mapa de distância de drenagem, sendo o cálculo realizado, no Spring, no módulo do LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico). Essa variável foi introduzida no modelo de inundação, como uma única variável de composição da área de fluxo acumulado e da distância de drenagem.

$$FDD = \left({}^{DD}/_{FACM}\right) \cdot 30 \qquad (2)$$

em que *FFD* é o termo que expressa a razão entre a distância de drenagem (DD em m) e a área de fluxo acumulado (FACM em número de células ou *pixel*), e 30 é o tamanho da célula do plano de informação final.

Ao contrário dos valores indicados pela área de fluxo acumulado, no qual os limiares de fluxo eram proporcionais à quantidade de fluxo na célula, o mapa de distância de drenagem

pelo fluxo acumulado (*FDD*) apresenta uma relação inversa. Assim, quanto menor for o limiar definido, maior será a área de fluxo acumulado na célula ou seção analisada. Foram adotadas as seguintes classes: de 0 a 200 (classe que indica grande acumulação de fluxo nessa seção de drenagem); de 200 a 500; de 500 a 1.000; de 1.000 a 5.000; de 5.000 a 10.000; de 10.000 a 50.000; de 50.000 a 100.000 e de 100.000 a 190.534,5625 (classe pouco representativa).

2.6 Ponderação

Os diferentes atributos adotados como critérios para a análise de regiões suscetíveis aos processos de inundação são ilustrados em quatro mapas temáticos, possuindo, assim, unidades temáticas diferentes quanto aos seus subcritérios. Dessa forma, há a necessidade de padronização dessas unidades, transformando critérios qualitativos em quantitativos e, posteriormente, realizando operação algébrica das informações. A ponderação visa ao estabelecimento de pesos em um espaço de valores predefinidos [0 a 1], sendo 0 o valor atribuído aos subcritérios ou às classes temáticas que menos contribuem para os processos de inundação, e 1 o valor para aqueles de maior contribuição. Esse método de ponderação foi definido devido à necessidade na operação dos dados pelo método de análise hierárquica, que, segundo Câmara *et al.* (2001), utiliza a média ponderada entre os planos de informação.

Somente para o mapa de uso e cobertura dos solos foram definidos pesos para cada classe de uso e cobertura do solo. Os valores foram empiricamente definidos em função do seu grau de impermeabilização (Tabela 2), conforme experiência em estudos anteriores na área e do comportamento dos processos observados em relação às variáveis consideradas.

Tabela 2. Pesos das classes de uso e cobertura do solo

Classe	Peso
Área Urbana Consolidada	1,00
Área Urbana em Consolidação	0,80
Área Urbana Parcelada	0,70
Área Urbana Parc. Veg. Ant.	0,50
Área Urbana Industrial	0,70
Área Urbana Industrial Parc.	0,30
Cultivo Temporário e Perene	0,35
Pastagem	0,40
Formação Savânica	0,30
Formação Florestal	0,25
Solo Exposto	0,55
Área Minerada	0,60
Aterro Sanitário	0,00
ETE	0,05
Cemitério	0,70
Aeroporto	0,01
Via Principal	1,00
Água, lago e lagoa	0,00
Nuvem	0,00

Os mapas de hipsometria, de declividade e de distância de drenagem por área de fluxo acumulado foram normalizados para se obterem valores entre 0 e 1, permitindo, assim, a conservação dos níveis de frequência dos *pixels* em suas respectivas classes. Para a realização do processo, foram usados planos de informação numéricos do mapa de declividade e do mapa de distância de drenagem por área de fluxo acumulado. Já para o mapa hipsométrico foi adotado o valor médio da amplitude das classes de altura, para o cálculo. Além disso, para fazer a normalização no mapa de hipsometria, houve sua divisão entre a região mais dissecada de Anápolis (porção oeste e a região centro-leste). Convém lembrar que a normalização foi inversa (Equação 3), uma vez que, em todos os mapas, quanto menor o valor do parâmetro, maior é a suscetibilidade à inundação, ou seja, mais próximo de 1:

$$P_n = \left(\frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \right) \quad (3)$$

em que P_n é o valor da célula normalizada, P é o valor da célula do plano de informação analisado, P_{min} é o menor valor de indicação de inundação entre todas as células, P_{max} é o maior valor de indicação de inundação entre todas as células.

2.7 Operação de dados pelo método de análise hierárquica

O método de análise hierárquica (MAH), ou *Analytical Hierarchy Process* (*AHP*), é uma teoria de comparação pareada ou lógica de comparação pareada. O MAH tem sido utilizado em aplicações de diversas áreas do conhecimento (SAATY, 1991).

Neste método é necessária a estruturação de uma hierarquia, composta por: meta; critérios; subcritérios (ou critérios secundários) e alternativas (CÂMARA, *et al.*, 2001). A composição de uma hierarquia ilustra a vantagem de analisar a inter-relação dos mais diversos níveis e elementos dentro de um sistema (SAATY, 1991) (Figura 5).

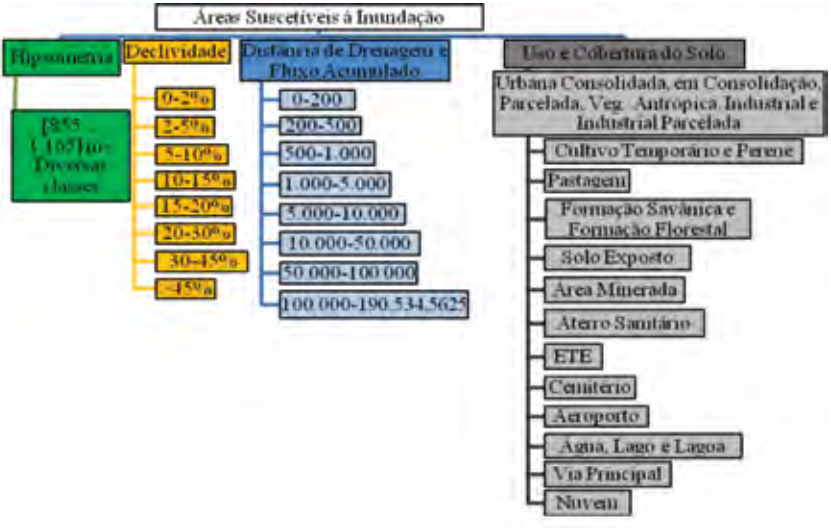


Figura 5. Hierarquia de processos, evidenciando o objetivo, os critérios e as classes (subcritérios).

Câmara *et al.* (2001) definem a hierarquia de processos como um método de suporte à decisão baseado na racionalidade, o qual pode ser utilizado quando se deseja mensurar o quanto determinado atributo influencia na tomada de decisão. A abordagem multicritério retorna pesos relativos a cada atributo adotado na análise; assim, cada mapa de entrada recebe pesos diferentes.

Para a realização da comparação pareada, Saaty (1991) explica que são adotados valores de comparação entre 1 e 9 (Tabela 3), devido esse ser o limite psicológico de comparação simultânea ($\cong 7 \pm 2$). É aceitável que a razão de consistência (*RC*) da análise seja menor ou igual a 0,10, e esse valor de *RC* indica a consistência dos julgamentos de comparação pareada para a tomada de decisão (SAATY, 1991). O programa Spring já dispõe da ferramenta de suporte a decisão, que simula as comparações pareadas, calcula os valores recíprocos, estabelece os valores das prioridades relativas para o uso nas equações matemáticas de operação algébrica espacial e retorna o valor da razão de consistência da análise pareada realizada.

A comparação pareada foi realizada entre o mapa de declividade, o mapa de uso e cobertura do solo e o mapa de distância de drenagem pela área de fluxo acumulado. O mapa de hipsometria foi utilizado como um fator de controle nas equações, pois, em locais elevados ou divisores topográficos de bacia hidrográfica, a probabilidade de inundação é praticamente nula, embora as formas de ocupação do solo sem infraestrutura adequada possam provocar inundações e alagamentos.

Tabela 3. Descrição da escala da lógica de comparação paritária.

Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes.	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade *i* recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade *j*, então *j* tem o valor recíproco quando comparada com *i*.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala.	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos *n*, para completar a matriz.

Fonte: Saaty (1991).

Uma vez que a comparação pareada deve estar entre três variáveis, foram obtidos seis cenários, resultando em seis combinações diferentes de ordem de importância dos atributos e, consequentemente, em seis mapas suscetibilidade a inundação diferentes conforme a ordem de importância das variáveis. A Tabela 4 apresenta a matriz de comparação com os valores de escala lógica de comparação e seus valores recíprocos obtidos.

Tabela 4. Matriz de comparação pareada adotada entre as três variáveis.

	V_1	V_2	V_3
V_1	1	2	4
V_2	1/2	1	3
V_3	1/4	1/3	1

Tal matriz resultou em uma equação com os coeficientes de ponderação dos atributos para realizar a operação com as três variáveis. Para a mesma equação foram aplicados os seis cenários distintos, dependendo da combinação dos atributos na equação conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Diferentes graus de importância adotados nos diferentes cenários.

Importância	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Alta	V_1. *FDD*	V_1. *D*	V_1. *U*	V_1. *U*	V_1. *D*	V_1. *FDD*
↑	V_2. *D*	V_2. *FDD*	V_2. *FDD*	V_2. *D*	V_2. *U*	V_2. *U*
Baixa	V_3. *U*	V_3. *U*	V_3. *D*	V_3. *FDD*	V_3. *FDD*	V_3. *D*

Obs.: *FDD* – mapa de distância de drenagem pela área de fluxo acumulado; *D* – mapa de declividade; *U* – mapa de uso e cobertura do solo.

3 Cenários de inundação

Os cenários foram definidos considerando as áreas impermeabilizadas de Anápolis, derivadas do mapa de uso e cobertura do solo: as urbanas em geral, os cemitérios, os aeroportos e as vias principais as quais podem favorecer o escoamento superficial por ter baixa infiltrabilidade, independentemente das características geomorfológicas e hidráulicas locais (Tabela 2).

Conforme Congalton (1991), as classificações digitais são geralmente avaliadas a partir das fotointerpretações. Assim, tem-se o pressuposto de que a fotointerpretação é sempre considerada correta, sem qualquer confirmação matemática ou estatística para a verificação da tendência dos dados. Porém, esse pressuposto pode ocasionar em classificações digitais erradas. Dessa forma, devido à complexidade das classificações digitais, faz-se necessária a adoção de métodos para avaliar a confiabilidade desses dados.

Todavia, é importante ressaltar que a utilização da fotointerpretação e da classificação digital por meio de análises quantitativas, em um mesmo produto cartográfico, ofereceu um

menor custo benefício na produção do mapa de uso e cobertura do solo, de acordo com o tempo demandado e a qualidade do resultado final obtido. Além disso, a classificação supervisionada foi fundamental para acelerar o tempo de processamento dos dados, bem como as filtragens realizadas na imagem *GeoEye*.

Assim, para a avaliação da qualidade das análises quantitativas de classificação digital da imagem *GeoEye* e para o mapa de uso e cobertura do solo, foram adotados dois índices de análise de qualidade, obtidos por meio da ferramenta de aferição da classificação do Spring: o índice de desempenho geral e o índice Kappa (ou estatística KHAT). Para cada polígono recortado da imagem de satélite obtiveram-se índices de classificação distintos (Tabela 6). De uma forma geral, os resultados foram suficientes e acima da meta de 85% de acurácia.

Os índices são derivados de uma matriz de erros, que é largamente utilizada para avaliação da qualidade de classificações digitais. O índice de desempenho geral é obtido pela razão entre o total de *pixels* classificados corretamente pelo total de *pixels* existentes na matriz. Já o índice Kappa é um indicador da porcentagem de valores corretos julgados em uma matriz de erros, onde os erros de omissão e comissão estão inclusos. Quanto mais próximo de 1 (ou 100%) o índice Kappa, maior a adequação com os dados verdadeiramente amostrados (CONGALTON, 1991; LILLESAND e KIEFER, 1994).

Tabela 6. Acurácia para cada polígono recortado da imagem e suas classes obtidas na classificação.

Área classificada fotointerpretada	Desempenho geral	Índice Kappa	Classes obtidas no mapa final
Área Urbana Consolidada	99,92%	99,85%	Área Urbana Consolidada, Formação Florestal e Área Urbana Parcelada com Vegetação Antropizada.
Área Urbana em Consolidação	99,98%	99,97%	Área Urbana em Consolidação, Formação Florestal e Área Urbana Parcelada com Vegetação Antropizada.
Área Urbana Parcelada	100,00%	100,00%	Área Urbana Parcelada e Formação Savânica.
Área Urbana Industrial	94,59%	91,72%	Área Urbana Industrial, Solo Exposto, Formação Florestal e Formação Savânica.
Demais áreas correspondentes às áreas agrícolas e naturais	90,98%	88,85%	Solo Exposto, Nuvem, Formação Florestal, Formação Savânica, Cultivo Temporário e Perene e Pastagem.
Aeroporto	99,96%	99,93%	Aeroporto, Solo Exposto, Formação Florestal e Formação Savânica.

Ao realizar a comparação dos atributos (Tabela 4), nos diferentes cenários (Tabela 5), foram obtidos os valores do vetor prioridade de *0,558*, *0,320* e *0,122*. Obtém-se, dessa forma, a Equação 4 de ponderação para cada cenário.

$$C_i = (0{,}558 \cdot V_1 + 0{,}320 \cdot V_2 + 0{,}122 \cdot V_3) \cdot h \quad (4)$$

em que *C* pode representar os *i* (diversos) cenários arbitrados (Tabela 4), V_1, V_2 e V_3 são os diferentes atributos adotados nos cenários (Tabela 5), e *h* é o plano de informação normalizado do mapa hipsométrico.

A *RC* da comparação pareada para a matriz de comparações (Tabela 4) foi de 0,016, estando dentro do limite inferior de 0,10 exigido para uma análise consistente.

Ao aplicar a Equação 4 nos diferentes cenários operando os atributos, foram obtidos os mapas que podem ser observados na Figura 6. É importante ressaltar que todos os cenários foram categóricos ao indicarem a suscetibilidade na zona central de Anápolis como crítica, confirmando as declarações já abordadas nos estudos de Lacerda *et al.* (2004), Oliveira *et al.* (2004), Teixeira *et al.*, (2004), Souza e Teixeira (2003), principalmente no rio das Antas e seus tributários.

É importante destacar que a porção oeste ao perímetro urbano, na área de relevo dissecado, que é uma bacia de característica rural, apresentou altos índices de suscetibilidades à inundação. Mesmo com as tentativas de separar os parâmetros morfométricos (hipsometria) e hidrológicos (fluxo acumulado) em duas porções distintas, para realização de uma análise que considera as duas áreas geomorfológicas como suscetíveis a processos diferentes, a porção oeste ainda apresentou grandes suscetibilidades à inundação.

Observa-se que, embora não existam registros de inundação nesse local, a região pode de fato apresentar suscetibilidades à inundação, de acordo com os cenários elaborados no presente estudo. Ou seja, o geoprocessamento como ferramenta de tomada de decisão cumpre seu papel, indicando a suscetibilidade do terreno à ocorrência de inundação. Assim, pode-se ressaltar que empreendimentos urbanos na área devem ser evitados, a menos que medidas preventivas e mitigadoras sejam adotadas.

Também, observando todos os cenários (Figura 6), foi possível verificar a existência de altas e moderadas suscetibilidades à inundação em grande parte das áreas impermeabilizadas, dentro do perímetro urbano, principalmente na zona central de Anápolis, mesmo quando foi atribuída baixa importância à variável de uso e cobertura do solo (cenários 1, 2, 5 e 6). Ao analisar os cenários 3 e 4, onde o atributo de uso e cobertura do solo é o de maior importância, foi possível visualizar toda a zona central de Anápolis entre as categorias de alta moderada e muito alta suscetibilidade à inundação.

As áreas impermeabilizadas agravam a situação de suscetibilidade à inundação em regiões que naturalmente já possuem grande fragilidade. Assim, a impermeabilização de grandes áreas só facilita o desenvolvimento dos processos mapeados. Daí advém a necessidade de novos mapeamentos, como esse realizado, para auxiliar na gestão e no planejamento urbano ambiental, indicando as possíveis consequências da ocupação urbana em cada área das bacias. Dessa forma, é possível estimar as áreas de inundação para diversas alternativas de uso e cobertura do solo, visando ao desenvolvimento ou planejamento de alternativas para a urbanização e prevenção de desastres naturais devido a precipitações pluviométricas.

Nos cenários 1 e 2 (Figura 6), onde há maior importância para o mapa de distância de drenagem pelo fluxo acumulado e para o mapa de declividade, respectivamente, foram observadas altas suscetibilidades à inundação nas proximidades das calhas de drenagem. Ou seja, quando ambos os atributos possuem maior importância que o uso e a cobertura do solo, as zonas de escoamento das calhas mais próximas das drenagens e áreas de várzea são destacadas

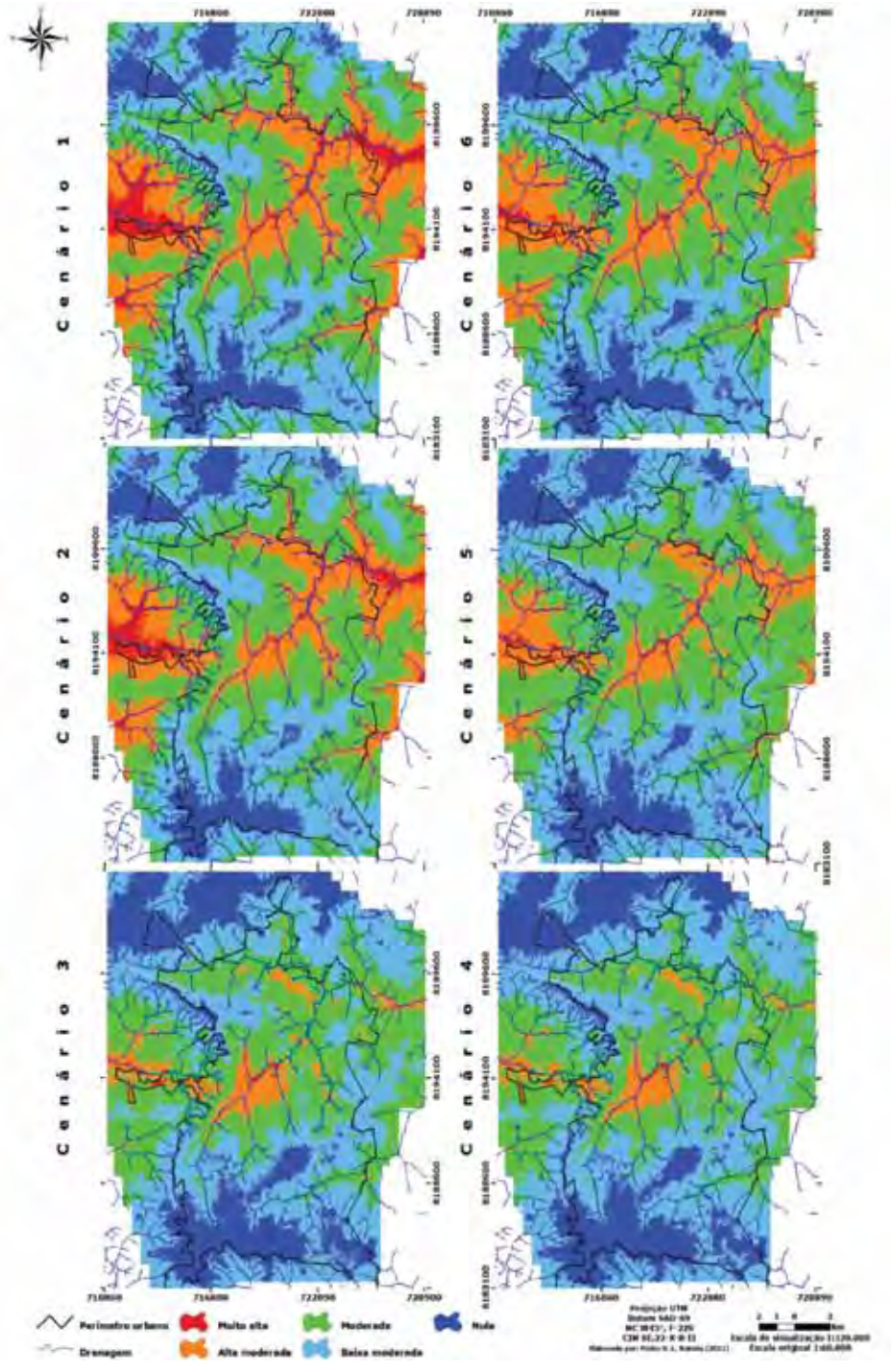


Figura 6. Coleção de mapas dos cenários de inundação de 1 a 6.

nas classes de moderada, alta moderada e muito alta suscetibilidade. Isso sugere que ambos os atributos são importantes para indicação de áreas altamente suscetíveis à inundação, como as planícies de inundação e os leitos de passagem das inundações.

4 Considerações finais

Conforme os cenários mostrados na Figura 6, a zona central de Anápolis, bem como outras porções do terreno mapeado, possuem naturalmente suscetibilidade à inundação entre moderada e alta, sendo tal fragilidade agravada devido à constituição de áreas impermeabilizadas em planícies de inundação, próximos aos leitos das drenagens e à montante dessas localidades, ou seja, o uso e a cobertura do solo foi um atributo do meio físico importante neste estudo para a construção dos cenários de inundação.

É possível também concluir que mapeamentos desse porte devem ser considerados de grande importância para elaboração de legislações que regulam o coeficiente ou a taxa de ocupação das construções em áreas residenciais, comerciais e industriais que possam ser de alta suscetibilidade à inundação. Essas informações devem ser consideradas na elaboração de planos diretores de ordenamento territorial urbano.

Lacerda *et al.* (2004) e Oliveira *et al.* (2004) fizeram mapas de inventário, nos quais se encontram observações de campo, registros históricos e informações valiosas da localização de eventos hidrológicos. Teixeira *et al.* (2004) e Souza e Teixeira (2003) colaboraram na identificação de registros e observações de campo dos processos de inundação. São trabalhos que podem validar modelos espaciais de identificação de suscetibilidade à inundação do meio físico. Sugerem-se, então, análises de correlação com trabalhos publicados para a validação dos cenários dos modelos espaciais de inundação.

É recomendável a obtenção da média entre todos os cenários calculados neste estudo, para verificar a possibilidade de um produto final único ou a aplicação de operações booleanas para identificar as áreas com maior suscetibilidade à inundação, que podem ser identificadas simultaneamente em todos os cenários.

Sugere-se a adoção de novos atributos para o embasamento das análises e inserção na comparação pareada, como, por exemplo: a litologia, a pedologia, a geomorfologia, os dados pluviométricos e as informações das cotas altimétricas da água alcançadas em eventos passados, bem como a avaliação da erodibilidade potencial do solo, pois o solo erodido provocará o assoreamento dos cursos d'água, agravando o problema e contribuindo para o surgimento de um novo cenário. Além de novos atributos, são recomendadas novas rodadas de cálculo dos cenários apresentados, porém utilizando ponderações arbitrárias, ou seja, sem a normalização dos dados, visando à análise dos resultados e calibração do MAH em novas escalas lógicas de comparação mais abrangente, utilizando toda a escala.

Para novos estudos de mapeamento de inundação por meio de ferramentas de geoprocessamento, sugere-se, no mínimo, a utilização dos atributos do meio físico de hipsometria, declividade e uso e cobertura do solo.

5 Referências bibliográficas

ALMEIDA, M. C. J.; FREITAS, C. G. L. (1996). Uso do solo urbano: suas relações com o meio físico e problemas decorrentes. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, São Carlos, SP, 1996. Anais... São Carlos: ABGE. p. 195-200.

ALMEIDA FILHO, G. S.; ALMEIDA, M. C. J. (2001). O impacto da expansão urbana no desenvolvimento de processos erosivos lineares no município de Bauru, SP. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, João Pessoa, PB, 2001. Anais... Rio de Janeiro: ABES. [Artigo IX-007], 16 p.

BATISTA, P. H. L. (2011). Geoprocessamento aplicado aos processos de inundação em Anápolis/GO. Brasília, DF, UCB. 44 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Católica de Brasília, Brasília.

BRASIL. (2010). Lei nº 4.771, de 15 de novembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 16 set. 1965. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4771.htm>. Acesso em: 05 jul. 2010.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). (2001). Introdução a ciência da geoinformação. São José dos Campos, SP, MCT/INPE [INPE-10506-RPQ/249], 345 p. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso: 14 mar. 2009.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; IT, F. M. (1996). Spring: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Computers & Graphics, v. 20, n. 3, p. 395-403.

CHRISTOFOLETTI, A. (1980). Geomorfologia. São Paulo, SP: Edgard Blücher. p. 1-127.

CONGALTON, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Berkeley, USA, Remote Sensing of Environment, v. 37, 1. ed., p. 35-46.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). (2008). Resoluções do Conama: resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e novembro de 2008. 2. ed. Brasília, DF: Conama. p. 86-88

DAS, B. M. (2007). Fundamentos de engenharia geotécnica. 6. ed, São Paulo, SP: Thomson Learning. p. 123.

EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT). (2011). EM-DAT: the office of U.S. Foreign Disaster Assistance (OFDA) and Center for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) International Disaster Database. Brussels, BE, Université Catholique de Louvain. Disponível em: <http://www.emdat.be>. Acesso em: 24 abr. 2011.

FRAGA, T. C.; NADAL, C. A.; GIUSTI, D. A. (2003). Uma aplicação do reconhecimento automatizado de redes de drenagem utilizando modelo digital de terreno. *In*: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, Curitiba, PR, 2003. Anais... Curitiba: UFPR, v. 1.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. (2006). Novo dicionário geológico-geomorfológico. 5. ed., Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil. p. 29, 116, 214, 220, 340, 351-352, 479, 519.

GUHA-SAPIR, D.; LECHAT, M. F. (1986). The impact of natural disasters: a brief analysis of characteristics and trends. Journal of the World Association of Emergency and Disaster Medicine, Wisconsin, USA, v. 2, n. 1-4, p. 221-223.

GUIMARÃES, M. L. G.; LACERDA, H. (2005). Acidentes geomorfológicos na microbacia do córrego Frutuoso em Anápolis (GO). *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEG, 3, Anápolis, GO, 2005. Anais... Anápolis: UEG. 6 p.

INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. (1998). Processos de dinâmica superficial. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo, SP: ABGE. p. 131-152.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2006). Manual técnico de uso da terra. 2. ed., Rio de Janeiro, RJ: IBGE, [Manuais Técnicos em Geociências, nº 7].

_____. (1992). Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, [Manuais Técnicos em Geociências, nº 1].

_____. (2011). Primeiros dados do censo 2010: dados Goiás. IBGE, Censo Demográfico 2000-2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/primeiros_dados_divulgados/index.php?uf=52>. Acesso em: 02 fev. 2011.

JESUS, A. S. (2011). Processos erosivos em Anápolis (GO): diagnóstico, medidas mitigadoras e prevenção. Brasília, DF: UnB. 46 p. Qualificação de Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

_____. (2007). Impactos na alta bacia urbana do Rio das Antas em Anápolis (GO). Goiânia, GO: IESA/UFG. 159 p. Dissertação (Mestrado em Geografia – Natureza e Apropriação do Espaço do Cerrado), Universidade Federal do Goiás, Goiânia.

LACERDA, H.; TEIXEIRA, L. L. F .M.; OLIVEIRA, S. N.; JESUS, A. S.; SANTOS, L. R. (2004). Erosão acelerada, assoreamento e inundações na área central de Anápolis (GO). *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOGRAFIA, 3, Uberlândia, MG. Anais… Uberlândia: UFU. p. 519-530.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. (1994). Remote sensing and image interpretation. 4. ed. New York, USA: John Wiley e Sons, Inc. 724 p.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. (2006). Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. Caminhos de Geografia, Uberlândia, MG, v. 6, n. 19, p. 130-149.

OLIVEIRA, S. N.; TEIXEIRA, L. L. F. M.; LACERDA, H. (2004). Riscos geomorfológicos e hidrológicos na microbacia do Córrego dos Cesários em Anápolis (GO). *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEG, 2, Anápolis, GO, 2004. Anais... Anápolis: UEG. 7 p.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. (2000). Hidrologia básica. Rio de Janeiro, RJ: Edgar Blücher. 278 p. (janeiro, reeditada).

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. (1998). Fitofisionomias do Bioma Cerrado. *In*: ALMEIDA, S. P.; SANO, S. M. (Org.). Cerrado: ambiente e flora. Planaltina, DF: EMBRAPA. 556 p.

SAATY, T. L. (1991). Método de análise hierárquica. São Paulo, SP: McGraw-Hill. 367 p.

SANTOS, K. R. (2010). Distribuição espacial das inundações em Goiânia (GO) e Análise desse Fenômeno na Bacia do Córrego Pedreira. Goiânia, GO: IESA/UFG. 100 p. Dissertação (Mestrado em Geografia – Natureza e Produção do Espaço), Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

SILVEIRA, A. L. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. (2004). Infiltração e armazenamento no solo. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3. ed. 1º reimp. Porto Alegre, RS: Ed. UFRGS/ABRH. p. 335-372.

SOUTO, K. V.; LACERDA, H. (2004). Uso da terra, erosão acelerada e assoreamento na microbacia do Córrego dos Góis, Anápolis (GO). *In*: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEG, 2, Anápolis, GO, 2004. Anais... Anápolis: UEG. 6 p.

SOUZA, C. R. G. (2004). Risco a inundações, enchentes e alagamentos em regiões costeiras. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1, Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis: GDEN/UFSC. p. 231-247.

SOUZA, J. C.; TEIXEIRA, S. S. (2003). Tipos de acidentes geomorfológicos-hidrológicos na área urbana de Anápolis. Anápolis, GO: UEG. 37 p. Monografia (Especialização e Geografia, Meio Ambiente e Turismo), Universidade Estadual de Goiás, Anápolis.

TEIXEIRA, L. L. F. M.; OLIVEIRA, S. N.; LACERDA, H. (2005). Erosões no Bairro Polocentro em Anápolis (GO): Cadastramento e relações com as formas de relevo e uso da terra. *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA; JORNADA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO DA UEG, 3 e 1, Anápolis, GO, 2005. Anais... Anápolis: UEG. 6 p.

TEIXEIRA, L. L. F. M.; ROMÃO, P. A. (2009). Análise integrada do meio físico como subsídio ao diagnóstico de processos erosivos na Bacia do Ribeirão Extrema em Anápolis (GO). Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, GO, v. 29, n. 2, p. 127-142.

TEIXEIRA, S. S.; SOUZA, J. C.; LACERDA, H. (2004). Erosão acelerada e inundações em Anápolis (GO): inventário a partir da imprensa local e dos registros do Corpo de Bombeiros. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 6, Goiânia, GO, 2004. Anais... Goiânia: AGB. 11 p.

TUCCI, C. E. M. (2004a). Controle de enchentes. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3. ed. 1º reimp. Porto Alegre, RS: Ed. UFRGS/ABRH, p. 621-658.

_____. (2004b). Escoamento superficial. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3. ed. 1º reimp. Porto Alegre, RS: Ed. UFRGS/ABRH, p. 391-441.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. (2004). Cartografia geotécnica. São Paulo, SP: Oficina de Textos. p. 120-167.

Capítulo 11

Queimadas, práticas agrícolas, recuperação de áreas degradadas e a infiltração no Cerrado

Maria Cristina de Oliveira
Christopher William Fagg
José Camapum de Carvalho
Carmen Regina Mendes de Araújo Correia

1 Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro e um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade considerados críticos e prioritários para a conservação (MITTERMEIER *et al.*, 2005). É considerada *hotspots* toda área prioritária para a conservação, isto é, rica em biodiversidade, com presença de espécies endêmicas e ameaçadas de extinção.

O bioma apresenta formações vegetais variando desde campos abertos até formações densas de florestas que podem atingir 30 metros de altura (RIBEIRO e WALTER, 2008) (Figura 1). São encontradas, aproximadamente, 12.000 espécies de plantas, das quais 35% são das áreas savânicas, 30% das florestas, 25% de áreas campestres e 10% ainda precisam ser mais bem estudadas quanto à sua distribuição original, pois podem ocorrer em mais de um ambiente. A fauna é rica, apresentando cerca 199 espécies de mamíferos, 837 espécies de aves, 180 de répteis e 150 de anfíbios, 1.200 de peixes e 67.000 de invertebrados. Os solos são predominantemente antigos, fortemente intemperizados, ácidos, profundos, bem drenados, com baixa fertilidade natural e com elevada concentração de alumínio. O clima é estacional, com um período chuvoso, de outubro a abril, seguido por um período seco, de maio a setembro, que favorece alta frequência de queimadas. Três grandes bacias hidrográficas (Platina, Araguaia-Tocantins e São Francisco) têm suas nascentes nesse bioma. Os Cerrados fazem fronteira e possuem áreas de transição com outros grandes ecossistemas brasileiros, exercendo papel-chave para o equilíbrio ambiental da Amazônia, Mata Atlântica e Caatinga.

Figura 1. Fitofisionomias do bioma Cerrado. (Fonte: Ribeiro & Walter 2008)

Apesar da sua importância, a velocidade de conversão de áreas nativas de Cerrados em áreas antropizadas já alteraram cerca de 40 a 55%, dos quase 2 milhões de km^2 de áreas naturais do bioma, nos últimos 40 anos (KLINK e MACHADO, 2005; SANO *et al*., 2009), sobretudo devido à alta demanda por terras para diversos usos, entre os quais agricultura, pecuária e urbanização. Soma-se a isso o fogo, que é bastante utilizado tanto para abertura de novas áreas para agricultura e pecuária, como para limpeza dessas áreas e controle de pragas e doenças (KATO, 2001).

A agricultura é a principal forma de utilização das terras no bioma. Aproximadamente 40% dele (SANO *et al*., 2010) era utilizado para prover serviços para o homem em 2002, como a produção intensiva de alimentos, fibras, bioenergia, pastagens, entre outros produtos, conforme RIBEIRO *et al.* (2012, no prelo). Para esses autores, quase dez anos depois, essas práticas agrícolas devem ocupar pelo menos mais de 50% da área natural do bioma. A evidente ampliação dessas atividades agrícolas deve acontecer com técnicas adequadas; caso contrário, além de não apresentar retorno econômico, pode também ameaçar o meio ambiente com a degradação dos solos por erosões hídrica e eólica, o assoreamento de cursos d'água e reservatórios, a lixiviação e o escorrimento superficial de nutrientes e químicos agrícolas, a poluição da água dos córregos, rios e lençóis freáticos, a degradação da vegetação com a perda de biodiversidade e a invasão biológica causada por dispersão de espécies exóticas (RIBEIRO *et al*., 2012, no prelo). Como consequências do manejo agrícola inadequado, criam-se bases para o conflito entre agricultura e conservação ambiental, ao mesmo tempo em que, ao se favorecer o escoamento superficial e intervir negativamente na capacidade de infiltração do solo, ampliam-se os riscos de inundações em áreas urbanas e propicia-se o surgimento de erosões de margem nos cursos d'água.

Neste capítulo, será apresentada uma revisão sobre queimadas, práticas agrícolas e recuperação de áreas degradadas ocorrentes no Cerrado e como essas práticas podem influenciar o processo de infiltração da água nesse bioma. Como complementação, foram realizados alguns ensaios de laboratório, utilizando-se amostras de um Latossolo e compostos químicos geralmente utilizados na prática agrícola.

2 Fogo no cerrado: origem e consequências

Relatos indicam que existiam queimadas naturais causadas principalmente por raios no Cerrado, entre 32.000 e 3.500 anos antes do presente (RAMOS-NETO e PIVELO, 2000; SALGADO-LABOURIAU e FERRAZ-VICENTINI, 1994). No entanto, somente há cerca de 300 anos, com a chegada do homem europeu ao Cerrado e a rápida ocupação da região, as queimadas para o manejo da terra passaram a ser realizadas de modo sistemático durante os meses da estação seca (COUTINHO, 1990, 1982). Hoje, não há dúvida de que o homem é o principal causador de incêndios de vegetação e que o número e a frequência deles são superiores aos incêndios naturais (COUTINHO *et al*., 1980). No entanto, até o momento, apesar das pesquisas já realizadas nesse ecossistema, os efeitos do fogo na flora, na fauna e nos solos não são ainda bem conhecidos.

Sendo um elemento natural com que o bioma Cerrado convive e evolui há milhares de anos (WALTER e RIBEIRO, 2010), o fogo pode ter um papel importante na ecologia do Cer-

rado. Em função disso, observa-se que muitas espécies inseridas nas fisionomias campestres e savânicas desse bioma apresentam características morfológicas e fisiológicas de resistência ao fogo (COUTINHO, 1990). Diferentemente, as fitofisionomias florestais são as menos sujeitas ao fogo, representando a vegetação menos adaptada a este (WALTER e RIBEIRO, 2010). Para Sato *et al.* (2010), é importante ressaltar que essas adaptações estão relacionadas a um regime de queima natural (incêndios durante os meses da estação chuvosa e de transição entre estação seca e chuvosa) que foi alterado desde o início da ocupação do Cerrado. Em períodos de seca, sempre foi possível ocorrer o fogo no Cerrado naturalmente, seja pela combustão natural da matéria orgânica, seja por faíscas oriundas do atrito entre minerais ou entre pelos de certos animais e folhagens secas.

O fogo, quando inserido em formações vegetais, pode ser caracterizado em três tipos: 1) fogo de superfície – é aquele que se propaga consumindo principalmente a vegetação do estrato rasteiro; 2) fogo de copa – é o fogo de superfície que, dependendo da distribuição e quantidade do material combustível, pode se desenvolver e atingir a copa das árvores, e 3) fogo subterrâneo – é aquele que se propaga na camada de matéria orgânica e é altamente destrutivo, provocando alta mortalidade na vegetação (LUKE e MCARTHUR, 1978). É importante ressaltar que a maior parte da biomassa do Cerrado está no subsolo, até 70%, dependendo da vegetação dominante (CASTRO e KAUFFMANN, 1998), e as causas apontadas para esse padrão se relacionam com a busca por água e nutrientes em camadas mais profundas (CAIRNS *et al.*, 1997), além de proteção contra o fogo (CASTRO-NEVES, 2007).

Para Kauffman *et al.* (1994), a fitofisionomia mais comum do bioma Cerrado, cerrado *sensu stricto*, favorece a ocorrência de incêndios de superfície, já que possui estrato rasteiro desenvolvido e estrato lenhoso não muito denso. Esse tipo de incêndio raramente atinge a copa das árvores mais altas. O fogo de copa ou que atinge o dossel da mata parece ser também evento raro nas matas do Cerrado, restringindo-se a situações incomuns diretamente influenciadas por ações humanas (WALTER e RIBEIRO, 2010). Porém, segundo esses autores, quando ocorre, provoca perturbações drásticas, como eliminação de muitos indivíduos adultos, de epífitas, além das plântulas e plantas jovens.

De maneira geral, dependendo da frequência, intensidade e escala, a ação do fogo pode causar grandes modificações na comunidade vegetal afetada. Dentre elas, destacam-se as modificações descritas a seguir.

a) *Alteração na estrutura da vegetação*

De maneira geral, durante eventos de queimadas em fitofisionomias mais abertas do Cerrado, a mortalidade dos indivíduos será maior entre os indivíduos de pequeno porte, ou seja, entre aqueles que ainda não possuem casca espessa o suficiente para oferecer proteção contra as altas temperaturas durante a passagem do fogo (SATO *et al.*, 2010). Por exemplo, enquanto a mortalidade de plantas lenhosas adultas varia de 13% a 16% (dez vezes maior em relação às áreas protegidas de fogo), incluindo árvores de 21 cm de diâmetro e 8,5 m de altura (SATO e MIRANDA, 1996), a mortalidade de plântulas é de 33% a 100% (HOFFMANN, 1996). Como consequência, esse evento pode causar diminuição da área ocupada e o raleamento da camada lenhosa. Outro fator que também colabora para essa situação é o fato de que, nas áreas queimadas, ocorre aumento da abundância das gramíneas e do seu banco

de sementes (MIRANDA, 2002; ANDRADE, 2002), situação que diminui drasticamente a sobrevivência e o crescimento de plântulas de espécies lenhosas nativas (HERINGER, 1971). Hoffmann (1996) observou, em área com até um ano depois de queimadas, que o estabelecimento das plantas foi drasticamente reduzido.

Hoffmann e Moreira (2002) constataram que o fogo também causa diminuição na altura média da vegetação. Outros autores como Ramos e Rosa (1996) e Armando (1994) também mostraram que queimadas regulares podem afetar a altura das plantas, áreas queimadas possuíam plantas menores do que aquelas protegidas do fogo por longos períodos de tempo.

Conforme enfatizou Henriques (2005) a partir de resultados obtidos em trabalhos de vários autores, verifica-se que o fogo modifica as fisionomias do Cerrado, de fisionomia fechada para aberta, principalmente no que se refere à modificação de fisionomias com maior densidade/altura de lenhosas e baixa abundância de gramíneas (por exemplo, cerradão) para um fisionomia com baixa altura/densidade de lenhosas e alta cobertura de gramíneas (por exemplo, cerrado *sensu stricto*, campo limpo, campo sujo). Por outro lado, Durigan *et al.* (1987), utilizando fotografias aéreas, analisaram o comportamento das fisionomias do cerrado *sensu lato* após 22 anos de proteção contra o fogo no Município de Assis, em São Paulo. Os resultados mostraram que a densidade e a altura da vegetação das fisionomias abertas evoluíram para uma fisionomia florestal mais densa, de porte mais alto após a proteção contra o fogo.

b) *Redução da biodiversidade*

Autores verificaram, para algumas fitofisionomias do bioma Cerrado, que eventos de queima resultam em diminuição na diversidade das comunidades vegetais (DURIGAN *et al.*, 1994; EITEN e SAMBUICHI, 1996; MOREIRA, 2000; SATO, 2003; SANTIAGO *et al.*, 2005; PARCA, 2007; LOPES *et al.*, 2009; OLIVEIRA, 2010). Para Hoffmann e Moreira (2002), a redução na diversidade vegetal deve-se à eliminação de espécies pouco resistentes ao fogo.

c) *Modificação no ambiente edáfico*

É muito importante conhecer-se o efeito do fogo sobre o solo para que se possa entender melhor a resposta do ecossistema à modificação causada pelo fogo (KATO, 2001). Sabe-se que o fogo provoca, de forma direta e indireta, diversas modificações de natureza física, biológica e, sobretudo, química. Para SPERA *et al.*, (2000) muitos autores condenam o uso do fogo como método de manejo de solo, atribuindo-lhe possíveis ações degradantes e esterilizantes.

Levando-se em conta que a queimada pode levar a morte de indivíduos e eliminação total da serrapilheira, fica evidente que o fogo diminui a proteção da superfície do solo, além de apresentar evidências na diminuição do teor de matéria orgânica do solo (KATO, 2001). Solos desnudos recebem impacto direto das gotas de chuva, o que causa a quebra dos agregados da superfície e ocasiona a obstrução dos poros. Isso resulta em compactação, selamento da superfície, além de ampliação no escoamento superficial (KATO, 2001; KATO e HARIDASAN, 2002). Os agregados têm grande importância por influenciar diretamente a estrutura do solo, que, por sua vez, influenciará a infiltração da água. Tem-se, ainda, que o solo desnudo fica submetido, com maior intensidade, aos efeitos de umedecimento e secagem, mecanismo auxiliar no processo de compactação, reduzindo ainda mais a capacidade de infiltração do

solo e ampliando o escoamento superficial desencadeador de processos erosivos de grande relevância.

Alguns trabalhos trazem evidências de que o fogo afeta a infiltração de água no solo (MALLIK *et al.*,1984; MARTINEZ-FERNANDEZ e DIAS-PEREIRA 1994; LEITE, 1996; KATO, 2001). De acordo com alguns estudos realizados, a queima promove a formação de crosta superficial e a redução da porosidade, as quais reduzem a infiltração da água no solo (HERNANI *et al.*, 1987). Água que não se infiltra nem evapora escoa superficialmente, o que leva ao aparecimento de erosões, alagamentos e inundações, além de não abastecer o lençol freático e causar alteração do ciclo das águas, que acabam propiciando longos períodos de seca (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2010). Para esses autores, é clara a existência de uma íntima relação entre práticas antrópicas, inundações e secas.

Com relação às modificações que o fogo causa nas características químicas do solo, alguns pesquisadores já estudaram esse efeito no Cerrado. De maneira geral, a queima da vegetação enriquece o solo da camada superficial para a maioria dos nutrientes, por catalisar o processo da mineralização (RHEINHEIMER *et al.*, 2003). Como as plantas somente absorvem nutrientes mineralizados, é natural que elas cresçam mais rapidamente em áreas queimadas (REDIN *et al.*, 2011). Entretanto, esses efeitos tendem a desaparecer, em médio prazo, na lixiviação dos nutrientes pela ação de chuvas, o que resulta em concentrações que podem ser até inferiores às observadas em solos que não sofreram ação do fogo (KNICKER, 2007).

Coutinho (1979), Batmanian e Haridasan (1985), Santos *et al.* (1992), Bustamante *et al.* (1998) e Nardoto (2000) já observaram aumentos de concentração de nutrientes e pH no solo do Cerrado após passagem do fogo. Para Hoffmann (1996, 1998, 2002), em comunidades vegetais queimadas anualmente, os nutrientes são retidos pela fração mineral e gradativamente transferidos ao solo como um todo. No entanto, queimadas muito frequentes podem reduzir gradualmente o estoque de nutrientes do solo sem permitir a sua recomposição (SOARES, 1995). Dessa maneira, a frequência de eventos de fogo é um fator que deve ser considerado quando são avaliados os impactos nos atributos do solo (RODRIGUES, 1999).

As propriedades químicas e biológicas do solo estão interligadas e são afetadas pelo fogo de forma simultânea. Como exemplo, pode-se verificar que, além do aumento temporário da disponibilidade de nutrientes, alteração de pH, aumento da fonte de C e oxidação da matéria orgânica do solo, há redução ou alteração da mesofauna após passagem do fogo (SANTOS *et al.*, 1992). Esses organismos possuem funções importantes como decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e formação de novos compostos minerais. A mesofauna do solo do Cerrado, constituída principalmente por microartrópodos e oligoquetos, desempenha função importante de movimentação dos poros do solo nas fissuras e nas interfaces entre a serapilheira e o solo (SPERA *et al.*, 2000), que facilitam a infiltração da água. A ação indiscriminada do fogo diminui a quantidade de material orgânico, fonte energética dos microrganismos, levando à diminuição da população da mesofauna e, consequentemente, à perda da capacidade produtiva do solo (ASSAD, 1996). O fogo também apresenta, de acordo com Decaëns, *et al.*, (2001) efeitos drásticos sobre a macrofauna do solo, como cupins e minhocas, que são os maiores componentes em biomassa da macrofauna nos solos de savanas e florestas da Colômbia. Em experimento realizado por esses autores, tanto a densidade quanto a biomassa e a riqueza da macrofauna tiveram redução drástica 15 dias após o fogo; no entanto,

após seis meses, foi observada recuperação da densidade e biomassa, mas não tanto a riqueza ou diversidade da macrofauna.

Santos *et al.* (1992) citam também redução ou alteração da população microbiana do solo após passagem do fogo. Bárcenas-Moreno *et al.* (2011) afirmam que, apesar do aumento da atividade microbiana imediatamente após a passagem do fogo, provocada pela mineralização de nutrientes, a recuperação da matéria orgânica do solo é lenta. Para Correia (2008), cada vez mais o papel da microbiota é reconhecido como fundamental para o processo de recuperação de áreas degradadas, já que revela a capacidade de recuperação do solo e de suporte ao desenvolvimento da vegetação.

d) *Modificações na qualidade do ar*

Desde a descoberta do fogo o homem tem contribuído inconscientemente para a degradação da qualidade do ar. A prática desse ato vem, paradoxalmente, crescendo proporcionalmente ao desenvolvimento das tecnologias e inovações (BRAGA, 2003). O aumento na concentração de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico nas últimas décadas tem ocorrido, principalmente, devido à queima de combustíveis fósseis, à atividade industrial, ao desmatamento e ao uso do solo. Nos trópicos, a substituição de florestas tropicais nativas em geral por atividades agropastoris tem sido uma das principais ações antrópicas responsáveis pelo incremento de CO_2 na atmosfera (PAIVA e Faria, 2007).

A liberação de CO_2 em excesso colabora com o aumento da temperatura da terra, já que retém o calor do sol irradiado da terra, provocando o que se intitula de efeito estufa. Por exemplo, a queima de uma árvore de várias toneladas resulta em poucos quilos de cinza e o restante transforma-se em gases, em sua maioria CO_2 e gás metano (CH_4), que causam o efeito estufa (RIBEIRO, 2001). Em condições normais, os gases da atmosfera ajudam a manter estável a temperatura do planeta, mas, em quantidades acima daquelas que o planeta pode suportar, podem provocar grandes catástrofes, como: derretimento das calotas polares e elevação do nível do mar, alterações climáticas e suas consequências (como prejuízo para a agricultura e a vegetação, extinção de animais que habitam as regiões mais frias, além de aumento de doenças) (TALARICO e FREITAS, 2006).

3 Influência do fogo e de insumos agrícolas em propriedades e comportamento de um latossolo

3.1 Aspectos gerais

Na prática da agropecuária nas áreas de Cerrado brasileiro, é comum o uso do fogo e de insumos agrícolas – o fogo para facilitar e baratear o manejo, e os insumos para propiciar seja a correção da acidez do solo, seja o ajuste dos nutrientes necessários ao desenvolvimento da cultura.

Embora o fogo possa propiciar elevações da temperatura do ar a valores da ordem de 800 ºC, no perfil de solo a elevação da temperatura é bem inferior e se dissipa ao longo de poucos centímetros. O aquecimento do solo afeta a sua umidade, proporcionando-lhe variações volumétricas. Ao mesmo tempo, a transformação da matéria orgânica em cinza disponibiliza

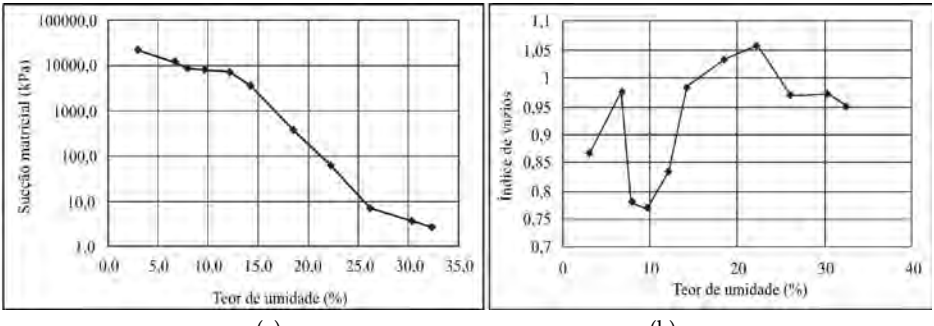
elementos químicos para trocas com o solo. No entanto, tanto o fenômeno de variação volumétrica como os de troca iônica dependem da composição químico-mineralógica do solo e do estado físico em que ele inicialmente se encontra. Com isso, há que se ter em mente que os resultados aqui apresentados não devem nem podem ser generalizados como definidores do comportamento dos solos do bioma Cerrado diante do evento fogo.

Quanto à utilização de insumos agrícolas no ajuste das propriedades químicas dos solos de Cerrado, os produtos utilizados variam segundo as características iniciais do solo tanto na composição como no teor dos diferentes compostos. Cabe aqui, por motivos semelhantes, no que tange à impossibilidade de generalização dos resultados apresentados, a mesma ressalva feita para o estudo quanto ao fogo.

3.2 Materiais e métodos usados no estudo laboratorial

Buscou-se, neste estudo, por meio de algumas análises laboratoriais, fazer uma avaliação preliminar qualitativa sobre qual seria o efeito do fogo e de alguns insumos agrícolas comumente usados na região do Cerrado em propriedades capazes de intervir na infiltrabilidade do solo. Para o estudo, utilizaram-se dois blocos de amostra de Latossolo Vermelho medindo 30 cm x 30 cm x 30 cm (blocos 1 e 2) e coletados a 1 m de profundidade em pontos diferentes do campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. O bloco 1 foi utilizado nos ensaios de fogo e infiltração, e o 2 nas análises granulométricas, nos ensaios de contração, ensaios de tração a compressão diametral e ensaios de percolação. Ensaios de pH e condutividade elétrica foram realizados sobre amostras provenientes dos dois blocos.

Os blocos 1 e 2 se encontravam, respectivamente, quando do início dos ensaios, com umidades de 11,9% e 14,5% e com índices de vazios (volume de vazios / volume de sólidos) iguais a 0,86 e 1,47. Guimarães (2002) encontrou para a mesma profundidade um índice de vazios de 1,60. Os menores valores obtidos para os blocos 1 e 2 podem estar ligados tanto a variabilidade do terreno como a desidratação por efeito de secagem. A Figura 2a apresenta a curva característica de retenção de água determinada para um bloco coletado entre 0,5 m e 1 m de profundidade (SILVA, 2012), apresentando porosidade semelhante à do bloco 1. A Figura 2b apresenta os



(a) (b)

Figura 2. (a) Curva característica de retenção de água; (b) variação do índice de vazios em função do teor de umidade gravimétrico (SILVA, 2012).

índices de vazios determinados para os pontos que compõem a curva característica. Ela aponta para dois aspectos relevantes: o primeiro é que a secagem do solo pode provocar significativa redução no índice de vazios do solo, e o segundo é que existe certa variabilidade desse índice mesmo dentro de um bloco.

Os blocos de solo utilizados foram coletados em um perfil com aproximadamente 8 m de solo profundamente intemperizado. Para a profundidade de 1 m, foi composto por gibsita (39,2%), quartzo (32,5%), caolinita (8,3%), hematita (6,8%), anastásio (5,9%), rutilo (3,8%) e goetita (3,5%) (GUIMARÃES, 2002).

A Figura 3 apresenta o processo de preparação do bloco 1 para os ensaios com uso do fogo. Inicialmente, foi realizada uma cavidade no bloco com 15 cm de diâmetro e 5 cm de profundidade no qual se determinou o índice de vazios pelo método do frasco de areia. Essa cavidade foi inicialmente utilizada para a realização de ensaios de infiltração em fase anterior ao uso do fogo. Em seguida, procedeu-se ao fogo e depois a novos ensaios de infiltração. Ao todo foram usadas três etapas de fogo seguidas de ensaios de infiltração. Adotou-se como durações dos fogos: 5, 6 e 15 minutos. A cinza proveniente das duas primeiras queimas foi coletada para caracterização e uso em outros ensaios. Para a realização do terceiro fogo, de modo a evitar o efeito dos fogos anteriores, foi feita outra cavidade semelhante à primeira no lado oposto do bloco. Antes da colocação do fogo foram realizados dois ensaios de infiltração na cavidade executada. Procedeu-se, então, ao terceiro fogo, mantendo-se ao final a cinza no interior do furo e fazendo-se os ensaios de infiltração. O objetivo desses ensaios era verificar a migração da cinza para o interior do bloco. Após o terceiro fogo, o solo apresentou, imediatamente após a queima, temperatura de 68 °C e, no início dos ensaios de infiltração, 28 °C. Todos os ensaios de infiltração foram realizados medindo-se os intervalos de tempo necessários para que ocorressem rebaixamentos de 5 mm na coluna d'água presente no interior da cavidade. Os experimentos começaram com 35 mm de coluna d'água e terminaram ao atingirem 10 mm. Foram realizadas em cada etapa pelo menos duas sequências de ensaio de infiltração.

Figura 3. (a) Bloco de Latossolo Vermelho preparado para os ensaios de infiltração e colocação do fogo; (b) folhas usadas como substrato; (c) fogo.

Os estudos concernentes à influência dos insumos agrícolas nas propriedades e no comportamento do solo foram realizados sobre o material do bloco 2. Como insumos agrícolas, foram usados separadamente e em mistura cloreto de potássio, uréia, calcário dolomítico e Yoorin – fósforo. Utilizaram-se, ainda, as misturas em iguais proporções dos três primeiros produtos e dos quatro, gerando-se, assim, dois outros compostos. Quando acrescentados os produtos e os compostos ao solo, as misturas foram intituladas respectivamente como M1, M2, M3, M4, M5 e M6.

Para o estudo das misturas, definiram-se teores que pudessem levar, a partir de uma análise simples e rápida, à percepção de como os compostos químicos afetariam as propriedades físicas e o comportamento mecânico do solo, principalmente no que tange à desagregabilidade e à compactabilidade por efeito de secagem. Não houve, portanto, preocupação em se trabalhar com teores médios normalmente utilizados na prática agrícola, até porque na distribuição no terreno certas porções do solo se mantêm isentas dos insumos agrícolas enquanto outras se submetem a elevados teores, maiores até que os adotados.

No estudo da influência dos insumos agrícolas, procedeu-se a três tipos de preparação de amostra, todos se utilizando solo proveniente do bloco 2. No primeiro, misturaram-se 100 g de solo úmido (87,3 g de solo seco) a 8 g (9,2%), 6 g (6,9%), 4g (4,6%), 2 g (2,3%) e 1 g (1,1%) de cada um dos produtos e acrescentou-se água até atingir o teor de umidade correspondente ao limite de plasticidade (wp = 23%, Silva 2012) mais 5%, ou seja, 28%. As misturas foram mantidas por 24 horas nessa condição de umidade antes de serem submetidas a ensaios de análise granulomética.

No segundo tipo de procedimento, misturaram-se 25g de solo (22,3 g de solo seco) a 0,25g (1,1%), 0,5 g (2,2%), 1 g (4,5%), 1,5 g (6,7%) e 2 g (9%) de cada um dos produtos. A essas misturas adicionou-se água até que se atingisse o teor de umidade correspondente ao limite de liquidez do solo (w_l = 38%, Silva 2012) mais 10%. Cabe destacar que essas umidades adotadas nesses dois tipos de procedimento (wp+5% e wl+10%) são facilmente atingidas pela camada superficial de solo quando das precipitações pluviométricas. Elas foram adotadas de modo a propiciar melhor interação entre o solo e os produtos químicos.

No terceiro tipo de preparação das amostras, moldaram-se, em cilindros de PVC medindo 13 cm de altura e 5 cm de diâmetro, corpos-de-prova indeformados talhados no bloco 2 com diâmetro igual ao do cilindro e altura de aproximadamente 5 cm. Com o solo amolgado, prepararam-se misturas de 100 g de solo úmido (87,3 g de solo seco) com 8 g de cada um dos produtos (9,2%) bem como com as misturas M5 e M6. Tomaram-se, então, 54 g de cada uma das seis misturas, que foram depositadas sobre os corpos-de-prova contidos no interior dos moldes. Para evitar passagem de água entre os corpos-de-prova e os moldes, selou-se com parafina a junção entre os dois no contato do topo dos corpos. Os moldes contendo os corpos-de-prova e o solo amolgado foram, então, depositados no interior de béqueres contendo em seus respectivos fundos uma camada de microesferas de vidro com aproximadamente 1 cm de espessura para que atuassem como dreno. Em seguida, os cilindros foram sendo completados com água, de modo a promover a percolação através do solo amolgado e dos corpos-de-prova. As soluções percoladas em 96 horas e 120 horas foram submetidas a determinações de pH e de condutividade. Procedeu-se, em seguida, à remoção de todo o fluido percolado, e nova percolação foi realizada com coleta da solução e determinação do pH e da condutividade após 24 horas de ensaio.

As outras 54 g das misturas dos produtos com solo foram utilizadas na determinação do pH e da condutividade das misturas preparadas com o solo amolgado. Determinaram-se ainda o pH e a condutividade do solo oriundo do bloco 1 misturado à cinza, sendo o teor de cinza, neste caso, igual a 2,6%. Todas as misturas foram umedecidas 24 horas antes da realização das determinações de pH e condutividade, procedendo-se em seguida à imersão de 10 ml de solo em água até atingir o total de 30 ml para a mistura.

3.3 Apresentação e análise dos resultados

O conjunto dos resultados concernentes às medidas de pH e condutividade está apresentado na Tabela 1. Em especial as variações da condutividade elétrica das misturas em relação ao solo puro e aos produtos e dos fluidos percolados em relação à água apontam para a presença ou não dos insumos nos materiais analisados.

Os resultados mostram que a percolação da água passando pelas misturas do solo com os produtos os solubilizou, propiciando suas passagens através da amostra de solo indeformada. Entre 96 horas e 120 horas registra-se pequena redução no pH, ao passo que a condutividade praticamente não se alterou. Porém, a remoção do fluido já percolado e a realização de novo ensaio de percolação conduziu à redução da condutividade e ao aumento do pH. É provável que o aumento do pH se deva ao menor intervalo de tempo decorrido entre a percolação e a medida; no entanto, a redução da condutividade reflete menor quantidade de produto químico solubilizado. Embora estudos mais detalhados devam ser realizados, esses resultados apontam para o rápido carreamento dos insumos no estado em que foram adicionados ao solo.

Os resultados obtidos para os ensaios de pH e condutividade elétrica realizados sobre a amostra coletada no solo em volta da cavidade após ser submetido ao fogo e os ensaios de infiltração sem que se removesse a cinza mostram que a cinza penetra tanto lateralmente como verticalmente. Comparando-se esses resultados de condutividade elétrica com os obtidos para o solo puro, verifica-se que, para o nível de percolação adotado no ensaio, o avanço da contaminação residual ficou restrito aos primeiros 2,5 cm.

Tabela 1. Resultados de pH e condutividade elétrica sobre materiais utilizados.

Material	pH				Condutividade µS/cm			
	1h	96h	120h	24h	1h	96h	120h	24h
Água destilada	5,46	-	-	-	1,26	-	-	-
Solo do bloco 1	6,36	-	-	-	9,8	-	-	-
Solo do bloco 2	7,23	-	-	-	27,4	-	-	-
KCl (P1)	6,75	-	-	-	44200	-	-	-
Uréia (P2)	7,22	-	-	-	92,3	-	-	-
Calcário dolomítico (P3)	9,21	-	-	-	99,5	-	-	-
Yoorin – fósforo (P4)	9,52	-	-	-	46	-	-	-
P5 (P1 + P2 + P3)	9,26	-	-	-	18330	-	-	-
P6 (P1 + P2 + P3 + P4)	9,23	-	-	-	11550	-	-	-
KCl + solo (M1)	7,3	-	-	-	51400	-	-	-
Uréia + solo (M2)	7,52	-	-	-	76,5	-	-	-
Calcário dolomítico + solo (M3)	8,04	-	-	-	224000	-	-	-
Yoorin – fósforo + solo (M4)	8,72	-	-	-	124,9	-	-	-
M5 (M1 + M2 + M3)	7,78	-	-	-	18770	-	-	-
M6 (M1 + M2 + M3 + M4)	8,11	-	-	-	14260	-	-	-
Solução percolada de M1	-	7,63	7,31	7,94	-	25900	25900	10500
Solução percolada de M2	-	7,86	7,71	8,21	-	312	315	227
Solução percolada de M3	-	8,02	7,72	8,26	-	163,5	163	136,5
Solução percolada de M4	-	7,97	7,82	8,16	-	126,3	126	87,9
Solução percolada de M5	-	7,92	7,73	8,37	-	11620	11570	5030
Solução percolada de M6	-	7,85	7,59	8,11		8020	7990	4760
Cinza	11,05	-	-	-	1353	-	-	-

(continuação)

Material	pH				Condutividade µS/cm			
	1h	96h	120h	24h	1h	96h	120h	24h
Solo + 2,6% de cinza	8,14	-	-	-	171,9	-	-	-
Solo + cinza lateral[1]	7,53	-	-	-	179,6	-	-	-
Solo + cinza 0-0,5cm[2]	7,23	-	-	-	49,5	-	-	-
Solo + cinza 0,5-1cm[2]	6,80	-	-	-	19,75	-	-	-
Solo + cinza 1-1,5cm[2]	6,87	-	-	-	14,16	-	-	-
Solo + cinza 1,5-2cm[2]	6,55	-	-	-	13,93	-	-	-
Solo + cinza 2-2,5cm[2]	6,50	-	-	-	10,44	-	-	-
Solo + cinza 2,5-3cm[2]	6,56	-	-	-	8,29	-	-	-

[1] Material coletado na lateral do furo usado no ensaio de infiltração após fogo de 15 minutos.

[2] Material coletado no fundo do furo usado no ensaio de infiltração após fogo de 15 minutos sem que fosse removida a cinza.

Após as percolações através dos corpos-de-prova contidos nos cilindros (material oriundo do bloco 2), foram determinados os pH e as condutividades das misturas dos produtos com o solo (amolgado), da parte superior (parte em contato com as misturas – topo) e parte inferior (base) dos corpos-de-prova. Para o solo amolgado, foram realizados ensaios antes e após a percolação. Os resultados, apresentados na Tabela 2, mostram que apenas no corpo-de-prova submetido à percolação por meio da mistura de solo com fósforo o nível de contaminação é praticamente inexistente. Nos demais casos, se comparadas as condutividades obtidas para os corpos-de-prova (topo e base) com os valores obtidos para os fluidos percolados, verifica-se que a retenção é relativamente pequena, ou seja, grande parte é solubilizada e carreada.

Tabela 2. Resultados de pH e condutividade elétrica em Latossolo Vermelho e nas misturas após os ensaios de percolação.

Material	pH				Condutividade (µS/cm)			
	Amolgado Antes	Amolgado Após	Topo	Base	Amolgado Antes	Amolgado Após	Topo	Base
Solo	7,23	-	-	-	27,4	-	-	-
M1	7,3	7,63	7,10	6,92	51004	38,8	200	122,8
M2	7,52	7,50	7,72	7,43	76,5	23	99,9	70,7
M3	8,04	8,10	7,33	7,30	224000	23,3	42,6	43,3
M4	8,72	8,87	7,43	7,46	124,9	133,9	29,2	29,2
M5	7,78	8,09	7,73	7,81	18770	146,5	157,7	709
M6	8,11	8,58	7,61	7,33	14260	144,7	237	759

A Figura 4 mostra que a adição dos insumos tende a desagregar a fração areia, ampliando o teor de silte e afetando, assim, a estabilidade estrutural dos agregados. Esse efeito foi mais marcante para as misturas M1 (a) e M2 (b) e pouco significativa na amostra M4 (d). Comparando-se os gráficos obtidos para as misturas M5 (e) e M6 (f), verifica-se ser a desagregação menos expressiva na mistura M6, o que indica ser a mistura M4, ou seja, o fósforo, inibidor desse fenômeno de desagregação. Os resultados mostram, ainda, que a cinza (g) praticamente não afeta a estabilidade dos agregados que compõem o solo estudado. É preciso ter em mente que a desagregação interfere diretamente nos processos de erosão e infiltração, pois

as partículas desagregadas são mais facilmente carreadas pela água e, quando permanecem no mesmo local, contribuem para a colmatação dos macroporos presentes nos solos tropicais profundamente intemperizados, como é o caso dos Latossolos.

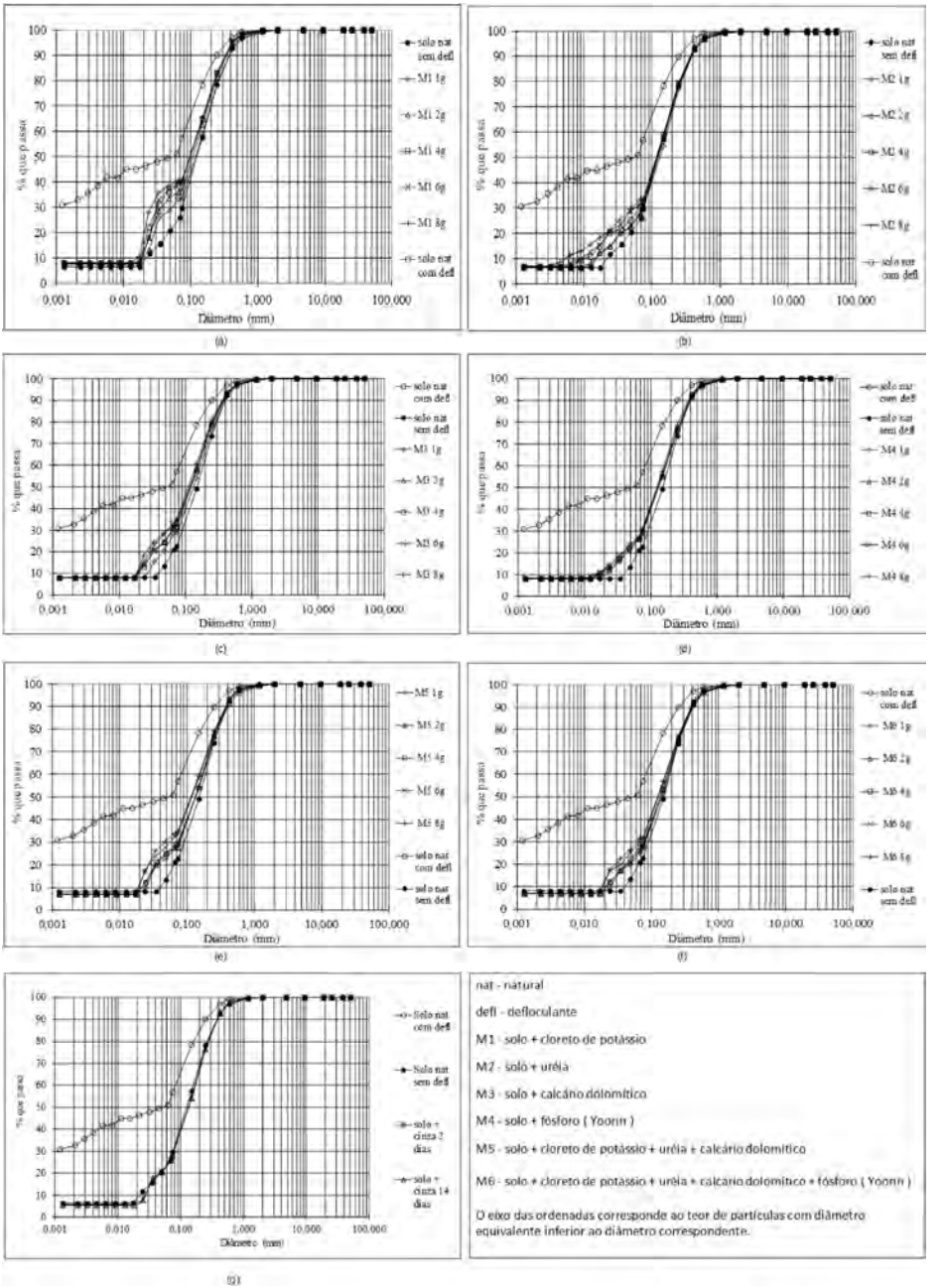

% que passa
Diâmetro (mm)
0,001
0,010
0,100
1,000
10,000
100,000
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
nat - natural
defl - defloculante
M1 - solo + cloreto de potássio
M2 - solo + uréia
M3 - solo + calcário dolomítico
M4 - solo + fósforo (Yoorin)
M5 - solo + cloreto de potássio + uréia + calcário dolomítico
M6 - solo + cloreto de potássio + uréia + calcário dolomítico + fósforo (Yoorin)
O eixo das ordenadas corresponde ao teor de partículas com diâmetro equivalente inferior ao diâmetro correspondente.

Figura 4. (a) Mistura M1; (b) mistura M2; (c) mistura M3; (d) mistura M4; (e) mistura M5; (f) mistura M6; (g) mistura solo + 2,6% de cinza.

Para avaliar a influência dos insumos agrícolas na estrutura do solo, foram feitas imagens em uma lupa eletrônica. A Figura 5 apresenta as imagens obtidas para a amostra natural e para as seis misturas estudadas, considerando-se apenas os menores (1,1%) e maiores (9%) teores de insumo agrícola incorporado ao solo. A primeira imagem desta figura mostra os corpos-de-prova preparados para os ensaios de contração e resistência à tração por compressão diametral e foram utilizados para fazer as imagens. De um modo geral, comparando-se as imagens obtidas para as misturas de solo com insumo agrícola às obtidas para o solo natural, percebe-se certo fechamento dos poros na superfície dos corpos-de-prova. Verifica-se também que o insumo utilizado na amostra M1 (KCl) tende a formar uma película na superfície do corpo-de-prova e o utilizado na mistura M2 (Uréia) dá origem à formação de cristais (Figura 6).

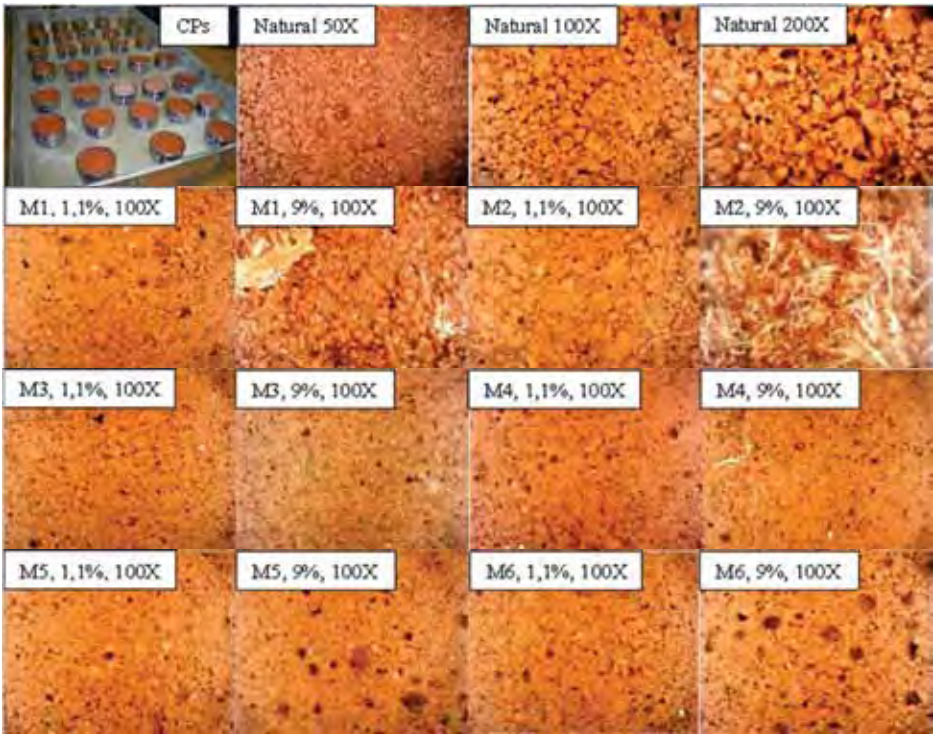


Figura 5. Imagens dos corpos-de-prova (CPs) de Latossolo Vermelho naturais e misturados aos insumos agrícolas.

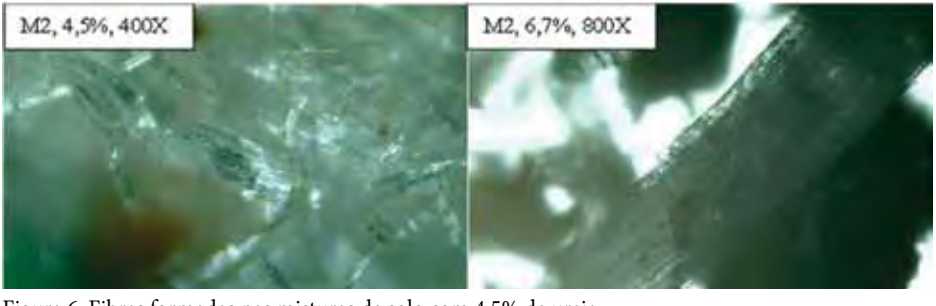


Figura 6. Fibras formadas nas misturas de solo com 4,5% de ureia.

A Figura 7a apresenta os valores de índice de vazios obtidos para as misturas quando desidratadas até a umidade higroscópica. Verifica-se que, de um modo geral, a mistura dos insumos agrícolas com o solo tende a aumentar o seu potencial de retração, contribuindo, assim, para a redução da infiltrabilidade. Quanto à influência dos insumos na resistência a tração (Figura 7b), não fica clara qualquer tendência, mas verifica-se que ela aumenta com a redução do índice de vazios, ou seja, quanto maior a retração sofrida pela mistura, maior a resistência à tração. Esse comportamento vai contribuir para minimizar o surgimento das trincas de tração na medida em que a resistência aumenta, e isso também contribui para reduzir a capacidade de infiltração das águas pluviais no maciço.

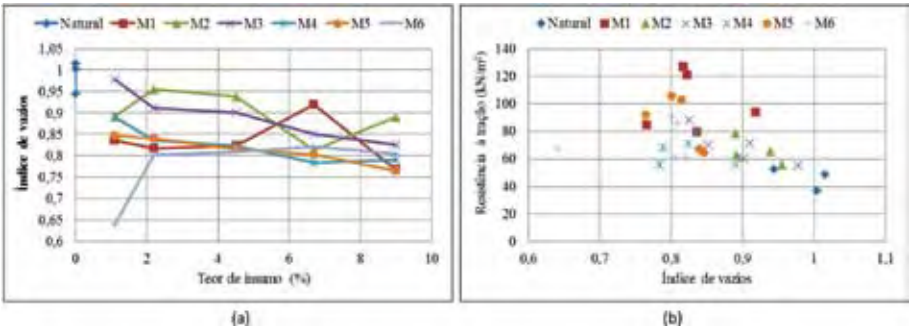


Figura 7. (a) Influência da adição dos insumos agrícolas na retração e (b) na resistência à tração.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de infiltração realizados na cavidade feita no bloco 1. A Figura 8a aponta para o fato de que a taxa de infiltração diminui à medida que o solo vai tendo o seu grau de saturação aumentado em consequência dos sucessivos ensaios de infiltração. Isso ocorre porque, com o aumento do grau de saturação, diminui a sucção, a qual atua como energia indutora da percolação somando-se ao efeito da carga hidráulica oriunda da coluna de água. Outra observação que pode ser feita sobre a Figura 8a é a de que, quando a umidade do solo é ainda baixa (três primeiros ensaios), a taxa de infiltração sofre significativa redução na fase inicial, voltando a aumentar em seguida. Provavelmente isso se dá devido ao efeito tamponador da fase ar quando o grau de saturação é ainda relativamente pequeno. Na Figura 4b, observa-se que tanto para o fogo de 5 minutos como para o de 6 minutos ocorre, inicialmente, um aumento na taxa de infiltração, o que provavelmente se deve ao aumento da sucção por perda de umidade na camada superficial do solo. No entanto, percebe-se que para os últimos ensaios após 6 minutos de fogo (ensaios 3 e 4) ocorre tendência à redução na taxa de infiltração. A mesma tendência é observada em relação aos ensaios realizados após 15 min de fogo na nova cavidade feita (Figura 8c). Embora mais estudos devam ser realizados, os resultados apresentados apontam para a tendência de queda na taxa de infiltração do solo devido à ação do fogo. Isso provavelmente estaria ligado ao fechamento dos poros na superfície do solo devido seja à presença da cinza, seja à retração em função da perda de umidade em consequência do aquecimento.

De modo geral, esses resultados apontam para o fato de que tanto o fogo como os insumos agrícolas podem contribuir para a redução da capacidade de infiltração do solo. Os resultados de condutividade e de pH mostram a necessidade de se avaliar melhor o risco de contaminação do lençol freático em consequência da solubilização e do transporte dos compostos químicos através do solo.

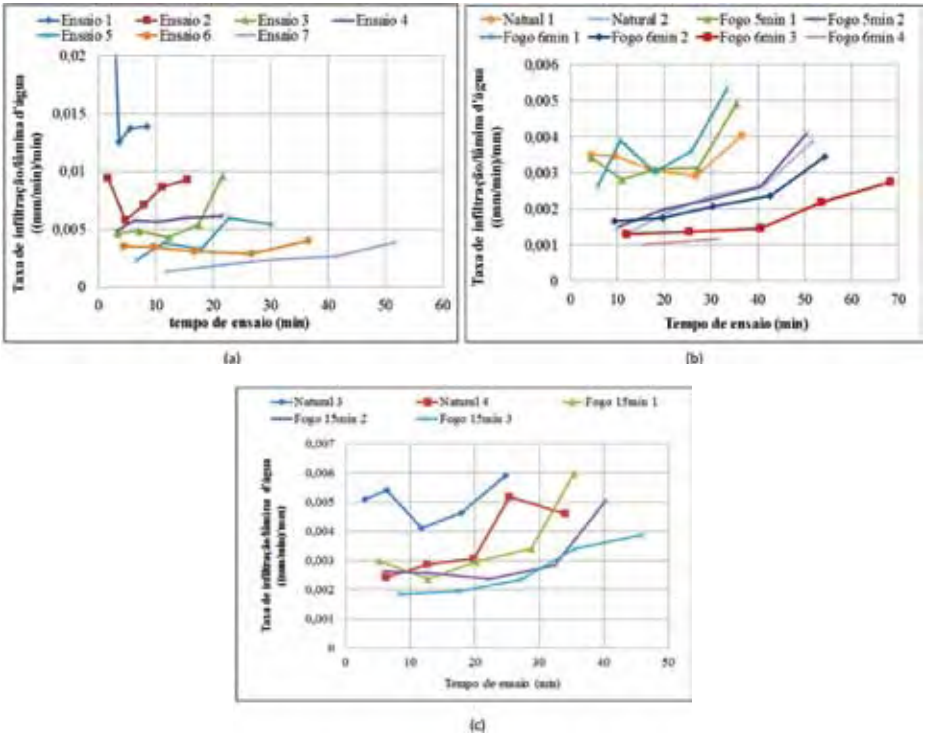


Figura 8. (a) Ensaios de infiltração sobre o solo natural; (b) ensaios de infiltração sobre amostra natural e após ação do fogo por 5 min e 6 min; (c) ensaios de infiltração sobre amostra natural e após ação do fogo por 15 min.

Os resultados experimentais concernentes à infiltração e ao fluxo apresentados neste capítulo levaram em conta apenas a condição em que uma coluna de água é imposta como indutora do fluxo, a exemplo do que ocorre na superfície do solo durante ou logo após uma precipitação pluviométrica. No entanto, há que se ter em mente que o fluxo pode ocorrer em meio não saturado, ou seja, sem que seja consequência direta de chuva ou presença de poça d'água dela proveniente. Esse fluxo em condição não saturada é imposto por gradientes de sucção presentes no perfil de solo. Guimarães (2002) ilustra a distribuição de tais gradientes ao longo do ano para o perfil de solo do qual se retiraram as amostras aqui estudadas. Lima *et al.* (2006) apresentam e discutem resultados obtidos por Nogueira (2005) em que a imposição de fluxo por gradiente de sucção provoca o transporte de soluções de cal e NaCl. Os autores mostraram que esse transporte gerou alteração da capacidade de troca de cátions do solo e fragilizou os agregados de silte e argila nele presentes. Diante disso, há que se admitir que, além dos transportes dos insumos agrícolas por meio do fluxo imposto por uma coluna de água, outros ocorrerão em consequência da atuação de gradientes de sucção ao longo do ano. A análise de tais aspectos, fluxo por imposição de coluna de água e por ocorrência de gradiente de sucção, é fundamental na avaliação da contaminação dos maciços e lençol freático, devendo ainda ser levado em conta o próprio diferencial de energia oriundo da natureza químico-mineralógica do solo ao longo do perfil, pois esta também gerará fluxo.

4 Restauração de áreas degradadas

No bioma Cerrado, estima-se que aproximadamente 46% da área é coberta por solo da classe Latossolos, que inclui: Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Latossolo Amarelo (LA) (REATTO e MARTINS, 2005). Os solos dessa classe, em geral, são ácidos, apresentam baixos teores de Ca, Mg, K e P, além de saturação por alumínio. Na paisagem, ocorrem em relevo plano a suave ondulado. O perfil de solo é profundo, poroso, de textura homogênea ao longo do perfil e capacidade de drenagem variando de bem, forte a acentuadamente drenado (REATTO e MARTINS, 2005).

Devido às condições de baixa fertilidade e acidez dos solos, as atividades agrícolas no Cerrado, até meados de 1960, eram limitadas e direcionadas à produção extensiva de gado de corte. Atualmente, o aporte tecnológico, oriundo de pesquisas, permitiu o desenvolvimento de práticas agrícolas com irrigação e a correção e adubação dos solos, tornando as terras do bioma Cerrado altamente produtivas (RIBEIRO *et al.*, 2012, no prelo). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011), na safra 2010/2011, a região do Cerrado foi responsável por 60%, 83%, 59%, 18% e 17%, respectivamente, da produção nacional de soja, algodão, milho, arroz e feijão. Na pecuária estão 41% dos 190 milhões de bovinos do rebanho nacional, responsáveis por 55% da produção nacional de carne e 41% da produção de leite.

No processo de desenvolvimento agrícola dos Cerrados, algumas falhas no planejamento e nas técnicas adotadas implicaram na degradação de muitas áreas. Yokoyama *et al.* (1995), Machado *et al.* (2004) e Assad e Pinto (2008) destacam que milhões de hectares no bioma estão com solos degradados química (nutrientes) e fisicamente (voçorocas). Muito desse problema é decorrente do processo de abertura e preparo para plantio dessas áreas. A abertura acontece, na maioria das vezes, por meio de correntões presos em tratores, onde a vegetação nativa vem sendo derrubada, para produzir carvão (RIBEIRO *et al.* 2012, no prelo). À derrubada geralmente se segue a preparação do solo para o plantio, por meio da aragem, correção e gradeamento. Nesse processo de desmatamento e preparação, o solo tem sua estrutura original destruída e exposta principalmente aos impactos da chuva (KATO, 2001). Além da possível perda de Carbono do solo, associada a sistemas produtivos degradadores, como as monoculturas em sistemas convencionais (COORBELS *et al.*, 2006). Aliados a isso, conforme mostraram os resultados experimentais apresentados na seção 3, os insumos agrícolas podem instabilizar a estrutura do solo e contribuir para a ampliação do processo de erosão laminar e para a redução da capacidade de infiltração do maciço. Para Kato (2001), chuvas de grande intensidade podem provocar grandes impactos na superfície do solo desnudo, causando desagregação e transporte do solo. O solo transportado é depositado em rios, córregos e reservatórios, causando seus assoreamentos.

Nesse contexto, definição de manejos adequados e promoção da restauração ecológica são as melhores alternativas para problemas decorrentes do uso inadequado do solo. Para Aquino *et al.* (2009), a restauração ecológica de sistemas degradados é tema que desafia e motiva pesquisas, discussões na mídia e preocupação de comunidades e governos, já que está relacionada à conservação de nascentes, de cursos d'água, de paisagens, do solo e da biodiversidade e, mais recentemente, está associada às questões sobre mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) e às mudanças globais do clima.

O estudo da recuperação das fitofisionomias do bioma Cerrado está evoluindo, sobretudo nas florestais (DURIGAN e SILVEIRA, 1999; DURIGAN *et al.*, 2001; FONSECA *et al.*,

2001; DURIGAN 2003; BECHARA, 2006; FELFILI *et al.,* 2007; SAMPAIO *et al.,* 2008). No entanto, a restauração de ambiente savânicos e campestres ainda é um grande desafio (SAMPAIO *et al*., 2008; DURIGAN *et al.*, 2011).

O fato é que, independentemente do ecossistema a ser restaurado, Durigan (2003) recomenda que as características da vegetação original, bem como seus fatores condicionantes, devem constar no planejamento da restauração ecológica em áreas de Cerrado. Assim as técnicas utilizadas podem diferir dependendo da fitofisionomia a ser restaurada.

Considerando essa situação, três tipos de sistemas de recuperação podem ser instalados dependendo do estado de degradação da área (FELFILI *et al.*, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2006):

1) regeneração natural;

2) regeneração artificial ou

3) utilização de um sistema misto em que os dois processos citados acima são adotados.

Para a utilização da *regeneração natural*, a degradação não pode ser severa, devendo estar limitada à retirada da cobertura vegetal. Neste caso, o primeiro passo é eliminar as causas da perturbação. Nesta situação, é muito importante cercar a área com o objetivo de impedir a entrada de animais domésticos e evitar que as plântulas e mudas sejam pisoteadas. Aceiros deverão ser construídos para evitar que o fogo destrua a vegetação que está se regenerando. Também há necessidade de se monitorar a invasão por espécies exóticas, principalmente gramíneas. Em seguida, deixa-se a natureza seguir seu curso, ou seja, espera-se que aconteça a regeneração espontânea e natural, a partir da brotação de estruturas subterrâneas ou por sementes existentes no solo, ou ainda por sementes que possam ser trazidas pelo vento ou por animais. Portanto, é necessário que exista nas proximidades vegetação nativa preservada que possa fornecer sementes para a dispersão. Essa maneira é mais fácil e mais barata, embora nem sempre seja possível, principalmente nos casos de excessiva degradação do solo.

A *regeneração artificial* é utilizada quando a situação da área a ser recuperada é de degradação total, ou seja, não existe nem solo disponível para o crescimento das plantas, ou o solo encontra-se muito compactado pelos ciclos de umedecimento e secagem ou mesmo pelo pisoteio de animais. Neste caso, o ideal é ajudar a natureza com o plantio de mudas de espécies nativas com solo da região, adaptadas ao local a ser recuperado. O custo dessa atividade é alto, mas o resultado pode ser mais rápido. Quanto maior o número de espécies plantadas, melhor, pois aumenta a biodiversidade e proporciona maiores condições para se chegar novamente aos aspectos e às características originais do local. Os cuidados com o fogo, as invasões por exóticas e o cercamento das áreas são importantes para o sucesso da recuperação.

O *sistema misto* visa acelerar o processo de regeneração natural da vegetação. Podem-se plantar mudas, plantar estacas e/ou espalhar sementes pela área e ainda estimular o processo de regeneração natural, criando condições facilitadoras para o estabelecimento de várias espécies, como, por exemplo, a fixação de poleiros artificiais para atrair aves que dispersam sementes de plantas e o coroamento das plantas em regeneração natural. Sempre que possível, plantar mudas de espécies frutíferas ajuda a atrair pássaros e outros animais para o local. Cuidados com o fogo, invasões por exóticas e o cerramento são também práticas importantes.

4.1 Técnicas de recuperação

No caso de adoção de sistema de regeneração manual, Módulos Demonstrativos de Recuperação de Áreas Degradadas para o Cerrado (MDR's) estão sendo recomendados para a

recuperação de áreas de Cerrado *senso stricto.* Os MDR's foram propostos pela Universidade de Brasília em conjunto com o Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Biodiversidade e Florestas e Embrapa Cerrados (FELFILI *et al*., 2005).

Os MDR's são unidades de plantio onde, em um espaçamento pré-determinado, plantam-se espécies arbustivas e arbóreas nativas do bioma. As espécies preferenciais utilizadas nesses plantios são aquelas de uso múltiplo, ou seja, aquelas que podem gerar mais de um benefício aos proprietários. Essas espécies permitem ao pequeno produtor ter novas fontes de alimento e ainda proporcionar renda extra nos primeiros anos do plantio, com a venda de produtos retirados das árvores, tais como: óleos, frutos, sementes, resinas e outros. Após certo tempo, esse tipo de plantio permite também a exploração da madeira.

Os módulos demonstrativos deverão ter tamanhos e formas conforme as dimensões da área a ser recuperada. Quanto à cobertura de árvores, as linhas e o espaçamento regular facilitam o plantio e as operações silviculturais de manutenção. Assim, propõe-se o plantio em linhas, em covas com 30 ou 40 cm de diâmetro por 60 cm de profundidade, com espaçamento de 3 x 3 m (FELFILI *et al*., 2005).

As diferentes espécies nativas de cerrado e de mata utilizadas no MDR permitem a ocupação rápida do solo por espécies florestais nativas com crescimento inicial rápido, que irão formar a estrutura da vegetação, sombrear as gramíneas invasoras e melhorar as condições do solo para facilitar a regeneração natural (FELFILI *et al*., 2007). As espécies de cerrado típico, cuja parte aérea cresce mais devagar, vão ocupar com suas profundas raízes o solo, e com o tempo o crescimento da parte aérea permitirá a cobertura do solo. Conforme Felfili *et al.* (2005), uma vez acelerada a recuperação com o plantio consorciado de espécies de uso múltiplo das várias formações vegetais do bioma, desbastes podem ser usados para selecionar espécies da fisionomia original, se desejado.

Independentemente da técnica adotada para recuperação de uma determinada área, a seleção das espécies arbóreas que serão plantadas tem de ser feita com base na caracterização ambiental, devendo, segundo Durigan *et al.* (2001), ser considerados os seguintes critérios:

a) plantar árvores nativas da região;

b) selecionar espécies que se adaptam ao tipo de solo da área a ser reflorestada;

c) empregar o maior número possível de espécies, gerando maior diversidade;

d) priorizar espécies que colaborem com alimento para a fauna, atraindo dispersores de sementes.

A Tabela 3 apresenta a relação de algumas espécies de uso múltiplo, nativas do bioma Cerrado, que podem ser utilizadas no plantio dos módulos de recuperação de cerrado *senso stricto*.

Tabela 3. Espécies de uso múltiplo, nativas do bioma Cerrado, que podem ser utilizadas no plantio dos módulos demonstrativos de recuperação de áreas degradadas no Cerrado (MDR).

Nome popular	Nome científico	Uso
Angico branco	*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan	melífera, energética, madeireira
Angico monjolo	*Acacia polyphylla* DC.	melífera, energética, madeireira
Angico preto	*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.	melífera, energética, madeireira
Aroeira	*Myracrodruon urundeuva* Allemao	medicinal, madeireira

(continuação)

Nome popular	Nome científico	Uso
Barbatimão	*Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville	medicinal e madeireira
Baru	*Dipteryx alata* Vogel	forrageira, amêndoa comestível e madeireira
Cagaita	*Eugenia dysenterica* Mart. ex DC.	melífera, ornamental, madeireira, medicinal e frutífera
Caju-do-cerrado	*Anacardium humile* A.St.-Hil.	melífera, medicinal e frutífera
Copaíba	*Copaifera langsdorffii* Desf.	melífera, madeireira e medicinal
Faveira ou fava d'anta	*Dimorphandra mollis* Benth.	ornamental, madeireira e medicinal
Gonçalo alves	*Astronium fraxinifolium* Schott ex Spreng.	madeireira e medicinal
Ingá	*Inga cylindrica* (Vell.) Mart.	ornamental, madeireira e frutífera
Ipê	*Tabebuia* spp.	melífera, ornamental, madeireira e medicinal
Jatobá da mata	*Hymenaea courbaril* L.	Frutífera, medicinal, madeireira
Jatobá do cerrado	*Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne	medicinal, frutífera e madeireira
Jenipapo	*Genipa americana* L.	frutífera, madeireira
Lobeira	*Solanum lycocarpum* A.St.-Hil.	medicinal, frutífera
Louro precioso	*Cryptocaria aschersoniana* Mez.	madeireira, fruto para a fauna
Mangaba	*Hancornia speciosa* Gomes	melífera, ornamental, madeireira, medicinal e frutífera
Pau formiga	*Triplaris gardneriana* Weddell	Arborização urbana, madeireira
Pau Pombo	*Tapirira guianensis* Aubl.	Arborização urbana, madeireira
Pequi	*Caryocar brasiliense* Cambess.	melífera, ornamental, madeireira e frutífera
Pitomba	*Talisia esculenta* (A.St.-Hil.) Radlk.	frutífera, madeireira
Quaresmeira	*Tibouchina stenocarpa* Schrank & Mart. ex DC.) Cogn.	melífera, ornamental
Tento ou Olho de cabra	*Ormosia stipularis* Ducke	artesanal, madeireira

Em uma síntese, Sampaio *et al.* (2008) descreveram os resultados da experiência prática de recuperação de fitofisionomias de matas de galeria e de Cerrado *senso stricto* no Distrito Federal realizadas por Rezende *et al.* (2006), Silva e Felfili (2005) e Mundim *et al.* (2006). Os resultados destacados estão descritos a seguir.

1. Espécies mais comuns em ambientes florestais, mas que apresentaram bom desempenho em áreas degradadas de cerrado *sensu stricto*, quando plantadas em covas profundas (no mínimo 0,40 x 0,40 x 0,40 m), adubadas e com cuidados silviculturais pós plantio, por pelo menos dois anos, são: *Acacia polyphylla* (Angico monjolo), *Albizia hassleri* (farinha-seca), *Anadenanthera colubrina* (angico branco), *Genipa americana* (jenipapo), *Hymenaea courbaril* (jatobá-da-mata), *Inga cylindrica* (ingá), *Myracrodruon urundeuva* (aroeira), *Platymiscium floribundum* (jacarandá-rosa), *Tabebuia roseo-alba* (ipê-branco), *Tapirira guianensis* (pau-pombo), *Triplaris gardneriana* (pau-formiga).

2. Em geral, espécies originárias das formações savânicas apresentam desenvolvimento da parte aérea mais lento do que as das espécies florestais, mas sua sobrevivência é elevada, inclusive em solos compactados. Dentre essas espécies se destacaram: *Hymenaea stigonocarpa* (jatobá-do-cerrado), *Magonia pubescens* (tingui), *Salacia crassifolia* (bacupari) e *Qualea grandiflora* (pau-terra-da-folha-larga).

Conforme Sampaio *et al.* (2008), várias espécies nativas do Cerrado têm se mostrado adequadas para a recuperação de áreas degradadas do bioma sob diversas condições de degradação, inclusive em plantios a pleno sol. Para esses autores, essas espécies são promissoras para formar a cobertura inicial do solo nas áreas degradadas, facilitando a restauração dos ambientes originais.

É sabido que as espécies savânicas e campestres, cuja parte aérea cresce mais devagar, vão ocupar o solo com suas profundas raízes. De fato, as plantas jovens do ambiente Cerrado apresentam, frequentemente, rápido crescimento radicular em profundidade, atingindo cerca de 50 cm em menos de 10 meses (PALHARES e SILVEIRA, 2007). No processo de infiltração da água das chuvas, o sistema radicular das plantas é fundamental. Como são extensas e crescem para baixo, as raízes ajudam na descompactação do solo e atuam como redutores da velocidade de enxurradas, aumentando, assim, a capacidade de infiltração da água no solo. Raízes de árvores adultas do Cerrado podem atingir profundidades maiores que 8 m e captar água, horizontalmente, a mais de 12 m de distância (PALHARES *et al.*, 2010). De acordo com Rawitscher (1948), as raízes de algumas espécies do Cerrado podem atingir até 18 m de profundidade. O aprofundamento das raízes das plantas se dá, geralmente, na busca por água. Guimarães (2002) mostrou para um perfil de Latossolo Vermelho que a zona ativa com grandes variações sazonais de teor de umidade se limita aproximadamente aos três primeiros metros do perfil de solo. Com isso, no período de estiagem, a sucção nessa zona aumenta enormemente, obrigando a planta a buscar água em maiores profundidades, o que gera o aprofundamento radicular. Por outro lado, as raízes são capazes de movimentar a água do solo de maiores profundidades para as camadas mais superficiais, realizando o processo conhecido como redistribuição hidráulica (SCHOLZ *et al.*, 2002)

Apesar do crescimento mais lento da parte aérea das espécies savânicas e campestres em comparação com o sistema subterrâneo, a parte aérea também tem papel importante no auxílio à infiltração. Por exemplo, a água da chuva que alcança a superfície do solo chega com força e velocidade menores quando há presença de vegetação. Essa vegetação retém parte da água em folhas, flores e galhos, fazendo-a chegar ao solo suavemente, sem causar erosão. Assim, ao retirar a cobertura vegetal de um solo, a água, que antes era retida pela parte aérea e absorvida pelas raízes das árvores para abastecimento dos lençóis d'água, escoa superficialmente, causando erosão, e acumula-se nas partes mais baixas do terreno, acarretando uma série de problemas como enxurradas alagamentos, enchentes e inundações.

Com a adoção e implantação de técnicas de recuperação, como, por exemplo, os Módulos Demonstrativos de Recuperação de Áreas Degradadas no Cerrado aqui citados, estar-se-á recuperando e/ou conservando o bioma, retendo solo, contendo a erosão, aumentando a infiltração de água no solo e evitando-se fenômenos como enchentes e inundações. Além disso, serão favorecidas a biodiversidade, e a conservação da beleza cênica do local, ao mesmo tempo em que se estará recebendo os benefícios econômicos provenientes dos recursos não madeireiros das espécies florestais plantadas.

5 Considerações finais

O texto apresentado deixa claro que a ocupação e o uso do solo do bioma Cerrado deve dar-se de modo cauteloso, estudando-se o solo, a vegetação nativa, as culturas a serem implantadas e levando-se em conta a interação entre a vegetação, o solo e o clima.

O uso indiscriminado do solo e de técnicas de manejo e de correção contribuem para a ocorrência de problemas, como a erosão e consequente assoreamento de cursos d'água e reservatórios, enchentes e inundações, pois podem afetar a capacidade de infiltração e ampliar o escoamento superficial.

A despeito de os estudos sobre os efeitos do fogo indicarem sua importância ecológica para o Cerrado, a utilização errônea pelas populações humana ainda é frequente. Todos os anos, assistimos a grandes incêndios, descontrolados e devastadores para a vegetação natural. Cabe aos educadores, pesquisadores e governantes esclarecerem que os danos do fogo se mostram maiores que os benefícios.

Agradecimento

Os autores agradecem aos técnicos Francisco Ricardo Mesquita de Queiroz e Sara Regina Morais Kollar e à pós-graduanda Claudia Maricela Gómez Muñetón o apoio na realização dos ensaios e imagens.

Referências bibliográficas

ANDRADE, L. A. Z. (2002). Impacto do fogo no banco de sementes de cerrado *sensu stricto*. Brasília: UnB. 175 f. Tese (Doutorado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

AQUINO, F. G.; OLIVEIRA, M. C.; RIBEIRO, J. F.; BARBOSA, F. B. (2009). Módulos para recuperação de Cerrado com espécies nativas de uso múltiplo. Documentos 250. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. 50 p.

ARMANDO, M. (1994). O impacto do fogo na rebrota de algumas espécies de árvores do cerrado. Brasília: UnB. 248 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. (2008). Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira. Revista Aquecimento Global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. Embaixada Britânica, 82 p.

ASSAD, M. L. R. C. L. (1996). Recursos biológicos: ocorrência e viabilidade. *In*: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8., INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília. Anais / Proceedings... Planaltina, DF: Embrapa-CPAC. p. 20-24.

BÁRCENAS-MORENO, G; GARCIA-ORENES, F; MATAIX-SOLERA, J; MATAIX-BENEYTO, J.; BAATH, E. (2011). Soil microbial recolonization after fire in a Mediterranean forest. Biol.Fertil.Soils, 47, p. 261-272.

BATMANIAN, G. J.; HARIDASAN, M. (1985). Primary production and accumulation of nutrientes by the ground layerd community of cerrado vegetation of central Brazil. Plant and Soil, 88, p. 437-440.

BECHARA, F. C. (2006). Unidades demonstrativas de restauração ecológica através de técnicas nucleadoras: Floresta Estacional Semidecidual, Cerrado e Restinga. Piracicaba: USP. 244 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

BRAGA, A. (2003). Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. São Paulo: Faculdade de Medicina, USP.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, F. B.; CASTRO, A. A. A.; GAROFALO, C. R.; NARDOTO, G. B.; SILVA, M.R.S. (1998). Effect of prescribed fires on the inorganic N concentration in soil of cerrado areas and on the assimilation of inorganic N by wood plants. *In*: VIEGAS, D. X. (Ed.). Proceedings of III International Conference on Forest Fire Reserch, Coimbra, Portugal, v. 2. p. 1361-1379.

CAIRNS, M. A.; BROWN, S.; HELMER, E. H.; BAUMGARDNER, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia, 111, p. 1-11.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; Lelis, A.C. (2010). Cartilha infiltração. Série Geotécnica, Universidade de Brasília, v.2. 36 p.

CASTRO, E. A.; KAUFFMAN, J. B. (1998). Ecosystem structure in the Brazilian cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. Journal of Tropical Ecology, 14, p. 263–284.

CASTRO-NEVES, B. M. (2007). Efeito de queimadas em áreas de cerrado *stricto senso* e na biomassa de raízes finas. Brasília: UnB. 82 p. Tese (Doutorado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CARDOSO, A.; BERNOUX, M; DOUZET, J. M.; SIQUEIRA NETO, M. (2006). Soil carbono storage potencial of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. Global Change Biology, 12, p.1773-1787.

CORREIA, C. R. M. A. (2008). Solos e a recuperação de áreas degradadas no Cerrado. *In*: FELFILI, J. M.; SAMPAIO, J. C.; CORREIA, C. R. M. A. (Org.). Bases para a recuperação de áreas degradadas na bacia do São Francisco. Brasília, Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Área Degradada. p. 77-88.

COUTINHO, L. M. (1979). Aspectos ecológicos do fogo no cerrado. III – A precipitação atmosférica de nutrientes minerais. Revista Brasileira de Botânica, 2, p. 97-101.

COUTINHO, L. M. (1980). As queimadas e seu papel ecológico. Brasil Florestal, 10, p. 7-23.

COUTINHO, L. M. (1982). Ecological effects of fire in Brazilian Cerrado. *In*: HUNTLEY, B. J.; WALKER, B. (Ed.). Ecology of tropical savanna. Ecological Studies, v. 42. Berlim: Springer Verlag. p. 273-291.

COUTINHO, L. M. (1990). Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. *In*: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). Fire in the Tropical Biota – Ecosystem Processes and Global Challentes. Berlin: Springer Verlag. p. 82-105.

DECAËNS, T.; LAVELLE, P.; JIMÉNEZ, J. J.; ESCOBAR, G.; RIPPSTEIN, G.; SCHNEIDMADL, J.; SANZ, J. I.; HOYOS, P.; THOMAS, R. J. (2001). Impact of land management on soil macrofauna in the eastern plains of Columbia. *In*: JIMENEZ, J. J.; THOMAS, R. J. (Orgs.). Natures plow: soil macroinvertebrate communities in the neotropical savannas of Columbia. CIAT, Cali, Columbia. p. 19-41.

DURIGAN, G. (2003). Bases e diretrizes para a restauração da vegetação do Cerrado. *In*: KAGEYAMA, P. Y.; OLIVEIRA, R. E.; MORAES, L. F. D.; ENGEL, V. L.; GANDARA, F. B. Restauração ecológica de ecossistema naturais. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. p. 185-204.

DURIGAN, G.; LEITÃO-FILHO, H. F.; RODRIGUES, R. R. (1994). Phytosociology and structure of a frequent burnt cerrado vegetation in SE-Brazil. Flora, 189, p. 153-160.

DURIGAN, G.; MELO, A. C. G.; MAX, J. C. M.; VILAS BOAS, O.; CONTIÉRI, W. A. (2001). Manual para a recuperação das matas ciliares do oeste paulista. São Paulo: Páginas & Letras. 16 p.

DURIGAN, G.; MELO, A. C. G.; MAX, J. C. M.; VILAS BOAS, O.; CONTIERI, W. A.; RAMOS, V. S. (2011). Manual para recuperação da vegetação de Cerrado. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: SMA. 23 p.

DURIGAN, G.; SARAIVA, I. R.; GARRIDO, L. M. A. G.; GARRIDO, M. A. O.; FILHO, A. P. (1987). Fitossociologia e evolução da densidade da vegetação do cerrado. Boletim Técnico do Instituto Florestal, 41, p. 59-78.

DURIGAN, G.; SILVEIRA, E. R. (1999). Recomposição da mata ciliar em domínio de cerrado, Assis, SP. Scientia Forestalis, 56, p. 135-144.

EITEN, G.; SAMBUICHI, R. H. R. (1996). Effects of long-term periodic fire on plant diversity in a cerrado region. *In*: PEREIRA, R. C.; NASSER, L. C. B. (Ed.). Simpósio sobre o Cerrado, 7., 1996. Anais... Brasília: Embrapa CPAC. p. 46-55.

FELFILI, J. M.; CARVALHO, F. A.; FAGG, C. W. (2007). Recuperação de matas secas e vegetações associadas no Vale do Paranã, GO. Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal. 32 p.

FELFILI, J. M.; FAGG, C. W.; PINTO, J. R. R. (2005). Modelo nativas do bioma: stepping Stones na formação de corredores ecológicos pela recuperação de áreas degradadas no Cerrado. *In*: Arruda, M. B. (Org.). Gestão integrada de ecossistemas aplicada a corredores ecológicos. Brasília: IBAMA. p. 187-209.

FONSECA, C. E. L.; RIBEIRO, J. F.; SOUZA, C. C.; REZENDE, R. P.; BALBINO, V. K. (2001). Recuperação da vegetação de Matas de Galeria: estudos de caso no Distrito Federal e Entorno. *In*: RIBEIRO, J. F.; FONSECA, C. E. L.; SOUSA-SILVA, J. C. (Orgs.). Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. p. 815-870.

GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. G.DM – 090ª/02. Brasília: UnB. 183 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília.

HENRIQUES, R. P. B. (2005). Influência da história, solo e fogo na distribuição e dinâmica das fitofisionomias no bioma Cerrado. *In*: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (Org.). Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. p. 73-92.

HERINGER, P. E. (1971). Propagação e sucessão de espécies arbóreas do cerrado em função do fogo, do cupim, da capina e do aldrim (inseticida). *In*: FERRI, M. G. (Coord.). Simpósio sobre o cerrado base para a utilização agropecuária. Editora da Universidade de São Paulo & Editora Itatiaia, São Paulo. p. 211-232.

HERNANI, L. C.; SAKAI, E.; LOMBARDI NETO, F.; LEPSCH, I. F. (1987). Influência de métodos de limpeza de terreno sob floresta secundária em latossolo amarelo do Vale do Ribeira, SP. II. Perdas por erosão. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 11, p. 215-219.

HOFFMANN, W. A. (1996). The effects of fire and cover on seedling establishment in a neotropical savanna. Journal of Ecology, 84, p. 383-393.

HOFFMANN, W. A. (1998). Post-burn reproduction of woody plants in a neotropical savanna: the relative importance of sexual and vegetative reproduction. Journal of Applied Ecology, 35, p. 422-433.

HOFFMANN, W. A. (2002). Direct and indirect effects of fire on radial growth of cerrado savanna trees. Journal of Tropical Ecology, 18, p. 137-142.

HOFFMANN, W. A.; MOREIRA, A. (2002). The role of fire in population dynamics of wood plants. *In*: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. S. (Eds.). Ecology and natural history of neotropical savanna: the cerrados of Brazil. The University of Columbia Press. p. 159-177.

KATO, E. (2001). Efeito da queimada na estabilidade de agregados, na resistência ao selamento superficial e na taxa de infiltração de água em solos de cerrado. Brasília: UnB. 58 p. Tese (Doutorado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

KATO, E.; HARIDASAN, M. (2002). The effects of fire on infiltration rates and surface sealing in a latosol under cerrado vegetation in central Brazil. *In*: Proceedings of IV International Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. Rotterdam, Hollanda: Millpress Science Publishers, v. 1. p.1-10.

KAUFFMAN, J. B.; COMMINGS, J.; WARD, D. L. (1994). Relationships of fire, biomass, and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. Journal of Ecology, 82, p. 519-531.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. (2005). A conservação do cerrado brasileiro. Megadiversidade, 1, p. 147-155.

KNICKER, H. (2007). How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. Biogeochemistry, 85, p. 91-118.

LEITE, L. L. (1996). Densidade global e infiltração de água no solo em área de cerrado submetido à queimada controlada no Distrito Federal, Brasil. *In*: MIRANDA, H. S.; SAITO, C. H.; DIAS, B. F. S. (Org.). Impactos de queimadas em área de cerrado e restinga. Brasília: Universidade de Brasília. p. 31-36.

LIMA, M. C. G., NOGUEIRA, J. F.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2006). A degradação dos solos devido ao fluxo. Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília: Editora Finatec. Capítulo 10, p. 321-371.

LOPES, S. F.; VALE, V. S.; SCHIAVINI, I. (2009). Efeito de queimadas sobre a estrutura e composição da comunidade vegetal lenhosa do cerrado sentido restrito em Caldas Novas, GO. Revista Árvore, 33, p. 695-704.

LUKE, R. H.; MCARTHUR, A. G. (1978). Bushfires in Australia. Canberra: Australian Government Publishing Service.

MACHADO, R. B.; RAMOS NETO, M. B.; PEREIRA, P. G. P.; CALDAS, E. F.; GONÇALVES, D. A.; SANTOS, N. S.; TABOR, K.; STEININGER, M. (2004). Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. Relatório técnico não publicado. Conservação Internacional, Brasília, DF.

MALLIK, A. U.; GIMINGHAM, C. H.; RAHMAN, A. A. (1984). Ecological effects of heather burning. Journal of Ecology, 72, p. 767-776.

MARTÍNEZ-FERNÁNDES, J.; DÍAS-PEREIRA, E. (1994). Changes of the physical and chemical properties in soil affected by forest fire in Sierra Larga (Murchia). *In*: SALA, M.; RUBIO, J. L. (Ed.). Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Logrõno: Geoforma ediciones. p. 67-77.

MIRANDA, M. I. (2002). Efeitos de diferentes regimes de queimadas sobre a comunidade de gramíneas do cerrado. Brasília: UnB. 106 p. Tese (Doutorado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

MITTERMEIER, R. A.; GIL, R. P.; HOFFMAN, M.; PILGRIM, J.; BROOKS, T.; MITTERMEIER, C. G.; LAMOREUX, J.; FONSECA, G. A. B. (2005). Hotspots revisited: earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. 2. ed. Boston: University of Chicago Press.

MOREIRA, A. G. (2000). Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. Journal of Biogeography, 27, p. 1021-1029.

MUNDIM, T. G.; FELFILI, J. M.; PINTO, J. R. R.; FAGG, C. W. (2006). Avaliação de espécies nativas do bioma Cerrado usadas na revegetação de áreas degradadas do Cerrado sensu stricto. Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer, 18, p. 47-64.

NARDOTO, G. B. (2000). Efeito de queimadas na mineralização do nitrogênio e em processos de ciclagem de nitrogênio em uma área de cerrado stricto sensu. Brasília: UnB. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

NOGUEIRA, J. F. (2005). Análise da influência do fluxo por capilaridade na degradação físico-química do solo. Brasília: UnB. 108 p. Dissertação (Mestrado Geotecnia), G.DM-137/05, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Brasília, Brasília.

OLIVEIRA, M. C. (2010). Vinte e quatro anos de sucessão vegetal na mata de galeria do córrego Capetinga, na fazenda Água Limpa, Brasília, Brasil: 1983-2007. Brasília: UnB. 174 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília.

OLIVEIRA, M. C.; RIBEIRO, J. F.; AQUINO, F. G. (2006). Recupere nosso cerrado, plante árvores nativas! Planaltina: Embrapa Cerrados. 36 p. (Embrapa Cerrados-DF, Documentos, 160).

PAIVA, A. O.; FARIA, G. E. (2007). Estoque de carbono sob cerrado sensu stricto no Distrito Federal, Brasil. Revista Tropica, 1, p. 59-65.

PALHARES, D.; FRANCO, A. C.; ZAIDAN, L. B. P. (2010). Respostas fotossintéticas de plantas de cerrado nas estações seca e chuvosa. Revista Brasileira de Biociência, 8, p. 213-220.

PALHARES, D.; SILVEIRA, C. E. S. (2007). Aspectos morfológicos de plantas jovens de *Brosimum gaudichaudii* produzidas em condições alternativas de cultivo. Revista Brasileira de Plantas Medicinais, 9, p. 93-96.

PARCA, M. L. S. (2007). Fitossociologia e sobrevivência de árvores na Mata de Galeria do córrego Pitoco, Reserva Ecológica do IBGE, DF, em 2006, após dois incêndios em 1994 e 2005. Brasília: UnB. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília.

RAMOS, A. E.; ROSA, C. M. M. (1996). Impacto das queimadas. *In*: DIAS, B. F. de S. (Coord.). Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis. Brasília: Fundação Pró-Natureza. p. 34-38.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. (2000). Lightning fires in a Brazilian savanna national park: rethinking management strategies. Environmental Management, 26, p. 675-684.

RAWITSCHER, F. (1948). The water economy of the vegetation of the campos cerrados in southern Brazil. Journal of Ecology, 36, p. 237-268.

REATTO, A.; MARTINS, E. S. (2005). Classes de solo em relação aos controles da paisagem do bioma Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUZA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (Org.). Biodiversidade e ecologia no Cerrado. Brasília: Embrapa. p. 48-59.

REDIN, M.; SANTOS, G. F.; PABLO, M.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. (2011). Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Ciência Florestal, 21, p. 381- 392.

REZENDE, R. P.; FONSECA, C. E. L.; FELFILI, J. M. (2006). Estabelecimento e desenvolvimento de espécies em plantios de recuperação de Matas de Galeria no Distrito Federal e em Goiás. Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer, 17, p. 59-77.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, J. C. P.; FERNANDES, V. B. B.; MAFRA, A. L.; ALMEIDA, J. A. (2003). Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. Ciência Rural, 33, p. 49-55.

RIBEIRO, J. A. (2001). Como usar, sem destruir, as reservas legais e matas ciliares. Porto Velho: Ministério do Meio Ambiente.

RIBEIRO, J. F.; OLIVEIRA, M. C.; FONSECA, C. E. L. (2012). Produção agrícola e conservação no bioma cerrado: é possível evitar este conflito de escolhas? Revista CEPPG, 26. (no prelo)

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. (2008). As principais fitofisionomias do bioma Cerado. *In*: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. M.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). Cerrado: ecologia e flora. Brasília: Embrapa Cerrado/Embrapa Informação Tecnológica, v.1. p. 151-212.

RODRIGUES, C. A. G. (1999). Efeitos do fogo e da presença animal sobre a biomassa aérea e radicular, nutrientes do solo, composição florística, fenologia e dinâmica de um campo de capim-carona (*Elyonurus muticus* (Spreng.) O. Ktze.) no Pantanal (sub-região da Nhecolândia). Campinas: UEC. 285 f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal), Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SALGADO-LABOURIAU, M. L.; FERRAZ-VICENTINI, K. R. (1994). Fire in the Cerrado 32.000 Years ago. Current Research in the Pleistocene, 11, p. 85-87.

SAMPAIO, J. C.; FELFILI, J. M.; PINTO, J. R. R.; FAGG, C. W. (2008). Síntese de experiências em recuperação de área degradadas com espécies arbóreas nativas do bioma Cerrado. *In*: FELFILI, J. M.; SAMPAIO, J. C.; CORREIA, C. R. M. A. (Org.). Bases para recuperação de áreas degradadas na bacia do São Francisco. Brasília: Centro de Referência em Conservação da Natureza e Recuperação de Áreas Degradadas. 216 p.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, G. L. (2010). Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. Environmental Monitoring and Assessment, 166, p. 113-124.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA; GUIMARÃES, L.; BEZERRA, H. S. (2009). Mapeamento da cobertura vegetal natural e antrópica do bioma Cerrado por meio de imagens Landsat ETM+. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 25-30 abr. 2009, Natal, Brasil. Anais... Natal: INPE. p. 1199-1206.

SANTIAGO, J.; SILVA JÚNIOR, M. C.; LIMA, L. (2005). Fitossociologia da vegetação arbórea na mata de galeria do Pitoco (IBGE-DF), seis anos após fogo acidental. Scientia Forestalis, 67, p. 64-77.

SANTOS, D.; BAHIA, V. G.; TEIXEIRA, W. G. (1992). Queimadas e erosão do solo. Informe Agropecuário, 16, p. 62-68.

SATO, M. N. (2003). Efeito em longo prazo de queimadas prescritas na estrutura da comunidade de lenhosas da vegetação do cerrado *sensu stricto*. Brasília: UnB. 91 p. Tese (Doutorado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília.

SATO, M. N.; MIRANDA, H. S. (1996). Mortalidade de plantas lenhosas do cerrado *sensu stricto* submetido a diferentes regimes de queima. *In*: MIRANDA, H. S.; SAITO, M. N.; SOUZA DIAS, B. F. S (Eds). Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga. Brasília: Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília. p. 102-111.

SATO, M. N.; MIRANDA, H. S.; MAIA, J. M. F. (2010). O fogo e o estrato arbóreo do Cerrado: efeitos imediatos e de longo prazo. *In*: MIRANDA, H. S. (Org.). Efeito do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de cerrado: Resultados do projeto fogo. Brasília: Ibama. p. 77-91.

SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J; GOLDSTEIN, G; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C. (2002). Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savana trees. Tree Physiology, 22, p. 603-612.

SILVA, J. P. (2012). Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamento e inundações e prevenção de processos erosivos. Brasília: Brasília, UnB. 211 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília. DF. G. TD-074A/12.

SILVA, J. C. S.; FELFILI, J. M. (2005). Desenvolvimento de três espécies arbóreas nativas de cerrado em área degradada no Distrito Federal. Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer, 15, p. 59-68.

SOARES, R. V. (1995). Queimas controladas: prós e contras. *In*: FÓRUM NACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1.; Reunião conjunta IPEF/FUPEF/SIF, 3., 1995, Piracicaba. Anais... Piracicaba: IPEF. p. 6-10.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SOUSA-SILVA, J. C. (2000). Características físicas de um latossolo vermelho-escuro no cerrado de Planaltina, DF, submetido à ação do fogo. Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira, 35, p. 1817-1824.

TALARICO, T. E.; FREITAS, P. L. (2006). Minha terra, meu futuro. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 100 p.

WALTER, B. M. T.; RIBEIRO, J. F. (2010). Diversidade fitofisionômica e o papel do fogo no bioma Cerrado. *In*: MIRANDA, H. S. (Org.). Efeito do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de cerrado: Resultados do projeto fogo. Brasília: Ibama. p. 59-76.

YOKOYAMA, L. P.; CEZARM, I. M.; KLUTHCOUSKI, J.; GOMIDE, J. C.; FERREIRA, C. M.; PEREIRA, P. A. A. (1995). Programa de recuperação de pastagens degradadas no cerrado brasileiro: sistema agropastoril auto-sustentável. Goiânia: Embrapa-CNPAF. 28 p. (Embrapa-CNPAF. Documentos, 59).

Capítulo 12

Avanço da frente de infiltração em solos profundamente intemperizados não saturados

Juliana Serna Restrepo
Joseleide Silva Pereira
José Camapum de Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior

1 Introdução

Hoje, vários são os problemas socioambientais ligados ao excesso de escoamento superficial ou associados aos sistemas convencionais de drenagem. Tanto o excesso de escoamento superficial, como a necessidade de implantação dos sistemas de drenagem estão, em áreas urbanas, atrelados à impermeabilização excessiva do solo. Portanto, a primeira ação preventiva passa por disciplinar a ocupação e o uso do solo. De qualquer modo, ocorrendo impermeabilização devido ao uso e à ocupação do solo, faz-se geralmente necessário implantar sistemas de drenagem, sejam eles convencionais ou não.

Os sistemas de drenagem podem ser convencionais ou não convencionais. Se por um lado os sistemas convencionais de drenagem contribuem para eliminar os problemas de erosão superficial e a formação de ravinas e voçorocas junto aos centros urbanos, por outro, eles terminam dando origem a erosões de margem de mananciais e a enchentes e inundações.

Os sistemas de drenagem não convencionais surgem, então, como alternativa mitigadora desses problemas, quiçá de solução. Esses sistemas geralmente lançam mão de processos de infiltração e, como tais, faz-se necessário compreender os mecanismos de fluxo de água e eventuais problemas que neles se originam, tais como erosão interna e perda da capacidade de carga do solo.

Na busca de contribuir para entendimento dos processos de infiltração, este capítulo apresenta uma análise do processo de infiltração segundo as condições de umidade iniciais do maciço. Como metodologia de estudo, optou-se pela realização de ensaios de infiltração em um mesmo furo de sondagem a trado, adotando-se diferentes intervalos de tempo entre eles. No estudo, as umidades foram determinadas antes e após cada ensaio a diferentes distâncias do ponto ensaiado.

2 Materiais e métodos

2.1 Localização e características da área de pesquisa

O estudo experimental de campo foi realizado no Distrito Federal, na área localizada nas seguintes coordenadas: latitude: -15,4556º, longitude: -47.5223º. O local escolhido para o

estudo, Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, localiza-se no Campus Universitário Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília. Esse local foi previamente definido durante a dissertação de mestrado "Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração" (SILVA, 2007) e é representativo dos solos regionais. A camada de solo estudada corresponde a um latossolo vermelho, de textura argilosa.

Para melhor entender o comportamento do maciço quando dos ensaios de infiltração realizados em diferentes épocas do ano, foram coletados os dados meteorológicos na estação automática do INMET, denominada Brasília-DF. A estação entrou em atividade no dia 7 de maio de 2000 e encontra-se localizada nas seguintes coordenadas: latitude: -15,7894º, longitude: -47.9256º. Sua altitude é de 1.159,54 m, sendo a estação mais próxima do local de estudo.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o clima de Brasília se apresenta como semisseco, com duas estações bem definidas: a seca e a úmida. A primeira ocorre de abril a meados de outubro, e a segunda, de meados de outubro a março. Invariavelmente, o mês mais seco do ano em termos de umidade relativa é agosto, e o mês mais frio é julho.

Durante o período de seca, a temperatura durante o dia é alta, caindo à noite. Entre abril e maio, acentua-se ainda mais a queda de temperatura à noite, com mínimas de 15ºC. Nesse período, as chuvas diminuem e a umidade do ar começa a cair. De maio até julho, as chuvas são escassas. As temperaturas à noite e de madrugada variam de 10 a 15ºC. A umidade do ar cai e a temperatura varia consideravelmente, com muito frio pela manhã, calor à tarde e frio à noite. De agosto até outubro tem lugar o período de seca intensa com chuvas ocasionais e a umidade do ar chega aos níveis mais baixos, atingindo algumas vezes o valor de 10%. Nesse período, há um aumento na temperatura durante o dia com quedas à noite. No início de novembro, começa o período de chuvas com trovoadas e com altas temperaturas. Esse período é geralmente de chuvas e calor intensos. Na estação chuvosa, há calor, chuvas, as temperaturas máximas variam de 28 a 32ºC e as mínimas de 20 a 25 graus. A Figura 1 apresenta os valores das precipitações acumuladas mensais e o número de dias com chuva para todos os meses do ano 2009.

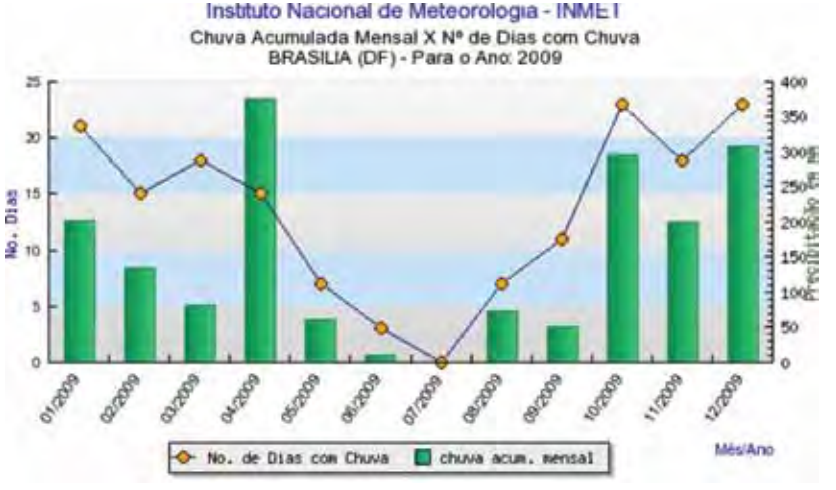


Figura 1. Dados de precipitação da estação automática do INMET Brasília DF (INMET, 2009).

2.2 Ensaios de campo

Os ensaios de campo foram realizados em cinco etapas, cada etapa diferenciada da anterior pelas condições iniciais de umidade do solo, principalmente nas proximidades do ponto ensaiado. Para a determinação da capacidade de infiltração de campo, foram executados ensaios de infiltração pelo método do rebaixamento em furo de sondagem a trado, o qual permite obter os valores médios de taxa de infiltração seguindo o procedimento de ensaio N° 04 da ABGE (1996). Para o monitoramento da frente de umedecimento, foram realizadas coletas de amostras a diferentes profundidades, antes e após os ensaios de infiltração, e determinadas as umidades em laboratório pelo método gravimétrico da estufa. Restrepo (2010) estudou ainda a variação da resistência não drenada do solo com o avanço da frente de umedecimento ocasionado pela infiltração.

2.2.1 Infiltração pelo método do rebaixamento em furo de sondagem a trado

Os ensaios de permeabilidade em furos de sondagens consistem na medida da vazão de infiltração ou remoção da água em função da aplicação de uma carga ou de uma descarga, respectivamente. Em maciços saturados, as cargas são diferenciais de pressão, induzidas por colunas d'água, resultantes de injeção d'água no furo; as descargas são diferenciais de pressão provocadas por retirada d'água do furo. Nos mantos não saturados, porém, tem-se ainda a atuação da poropressão negativa de água como gradiente de energia indutor da infiltração. Nesses solos, pode ocorrer com o avanço da frente de saturação ocorrência de pressão positiva na fase ar, que passa a atuar como inibidora da infiltração. Este capítulo analisa, por meio de ensaios de rebaixamento em furo de sondagem, o processo de infiltração em um perfil de solo profundamente intemperizado, poroso e não saturado.

Durante a pesquisa, foram executadas cinco etapas de ensaio de infiltração em um furo a trado executado manualmente com 10 cm de diâmetro e 2,0 m de profundidade. Em cada ensaio, preencheu-se o mesmo furo até o topo com água oriunda da rede de abastecimento público e, com a utilização de uma régua, fixou-se o nível superior em 0,0 cm, correspondendo ao tempo de ensaio t=0. Em seguida, fizeram-se as leituras dos tempos em que ocorriam os rebaixamentos sucessivos de 5 cm até atingir o rebaixamento total de 30 cm (Figura 2). Quando o nível da água atingia esta cota, preenchia-se novamente o furo com água até o seu topo e repetia-se o procedimento até obterem-se tempos de infiltração aproximadamente constantes, ou seja, quando já não eram observadas variações significativas nos valores lidos de taxa de infiltração.

Figura 2. Ensaio de rebaixamento em furo de sondagem a trado.

2.2.2 Determinação das umidades pelo método gravimétrico

Para o monitoramento da frente de umedecimento antes e após os ensaios de infiltração, foram feitas coletas de amostra por meio de trado manual e determinadas as umidades por meio de ensaios gravimétricos. As coletas de amostra foram realizadas seja em pré-furos de menor diâmetro executados por meio dos ensaios PANDA, seja diretamente por meio da escavação a trado sem pré-furo.

No estudo, foram feitos 39 furos a trado manual. O primeiro deles foi destinado aos ensaios de infiltração, e os demais, à inspeção das umidades, sendo estes denominados furos de inspeção (Figura 3). Os furos de inspeção foram escavados em linha reta, distribuídos diametralmente nos dois sentidos em relação ao furo de infiltração até a profundidade de 3,5 m. Em um sentido, executaram-se os furos antes do ensaio de infiltração e, no outro, depois. Os furos de inspeção se situaram a 0,50 m, 1,50 m, 2,50 m e 3,50 m do ponto ensaiado. Para cada ensaio de infiltração foram feitas as coletas em perfis a cada 0,50 m de profundidade, até atingir a cota de 3,5 m em relação à superfície do terreno. A coleta de amostras iniciava-se a partir do perfil mais distante do ponto ensaiado.

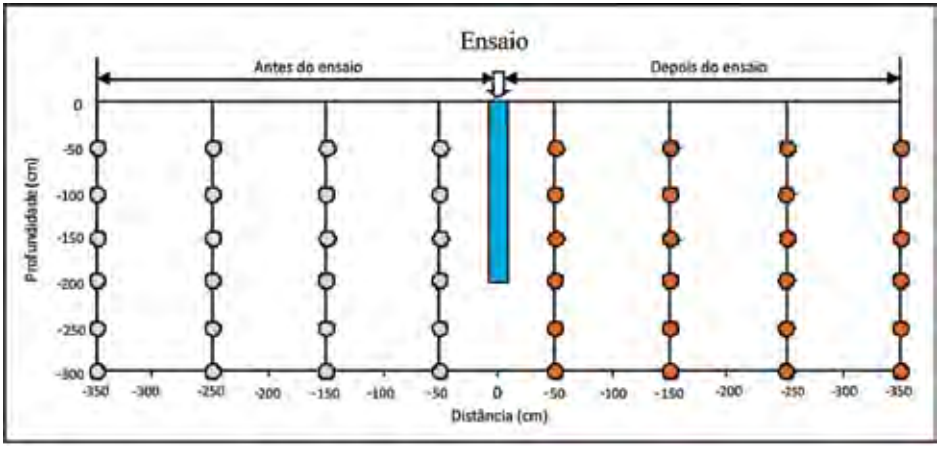


Figura 3. Malha de amostragem das umidades.

Os furos de inspeção foram executados nas datas de realização das etapas dos ensaios de infiltração, segundo a distribuição indicada na Figura 4. A primeira etapa foi realizada no dia 18 de setembro de 2009, sendo feitos o furo principal e seis furos de inspeção de umidade, três antes e três depois da realização no ensaio de infiltração no furo principal. As amostras de solo coletadas foram colocadas em sacos plásticos, os quais, em seguida, foram hermeticamente fechados e conduzidos ao Laboratório de Geotecnia para determinação dos teores de umidade por meio do método gravimétrico. Após as retiradas das amostras, os furos de inspeção foram preenchidos com uma mistura de cimento e bentonita em proporção 1:2. Esse procedimento foi adotado em todas as etapas, com a diferença que para as demais realizaram-se oito furos de inspeção em vez de seis, sendo quatro antes e quatro depois do ensaio de rebaixamento. Essa mudança se deu devido à necessidade de se estender, por mais 1,0 m em planta, o campo de inspeção da ação da água infiltrada.

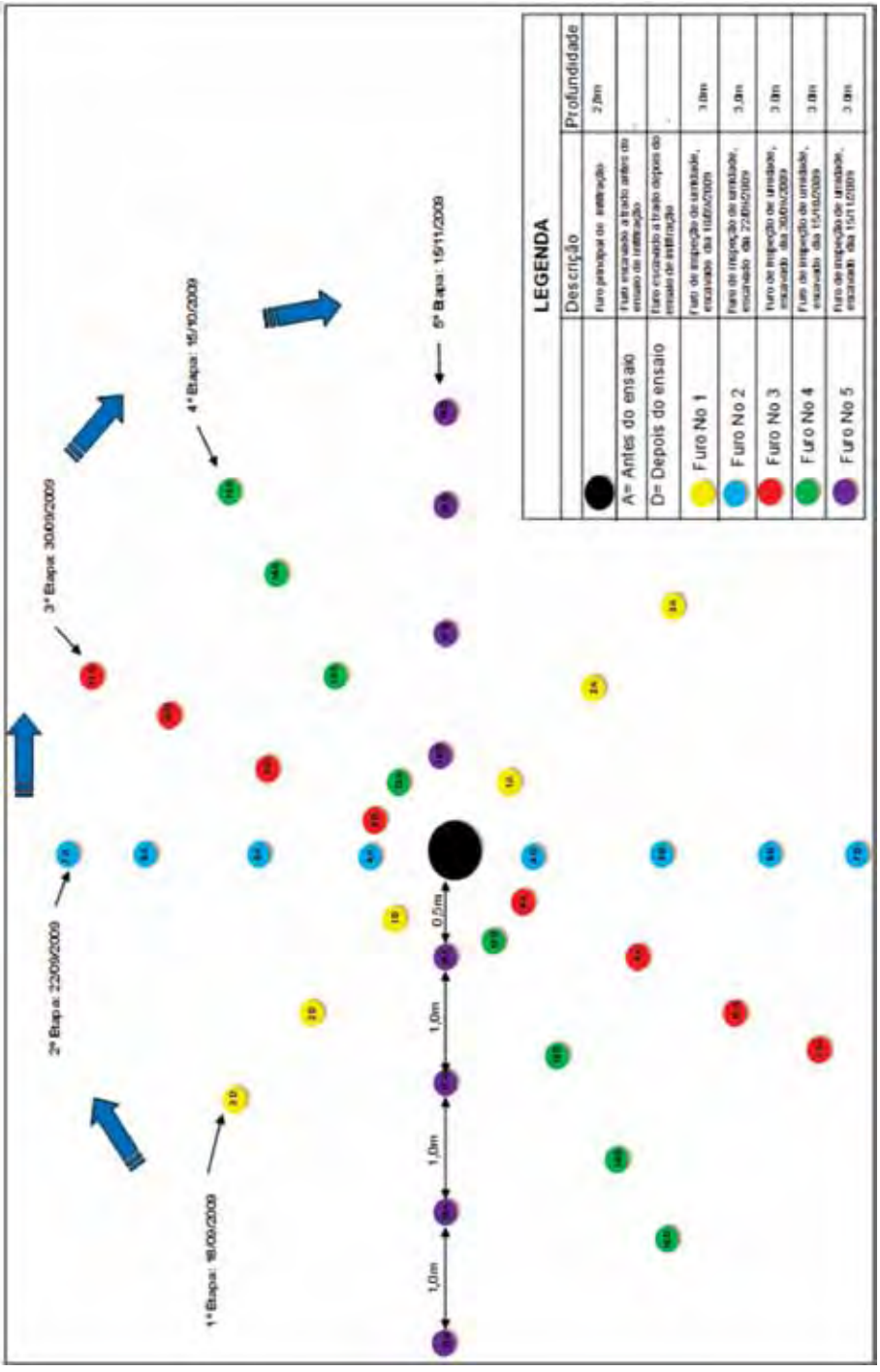


Figura 4. Vista em planta da distribuição dos furos de inspeção.

3 Resultados obtidos

Conforme já mencionado, os ensaios foram realizados em cinco etapas: 1ª etapa – 18/09/2009; 2ª etapa – 22/09/2009; 3ª etapa – 30/09/2009; 4ª etapa – 15/10/2009; 5ª etapa – 15/11/2009. Esse referencial das datas de realização dos ensaios é importante, pois as umidades dos solos naturais estão associadas ao nível de precipitação e à evaporação antecedente e, portanto, à estação climática. A Figura 5 apresenta a distribuição das precipitações no período de realização dessas cinco etapas de ensaio. A precipitação acumulada mensamente de setembro a novembro, foi, respectivamente, de 49 mm, 297 mm e 202 mm, totalizando 548 mm no período.

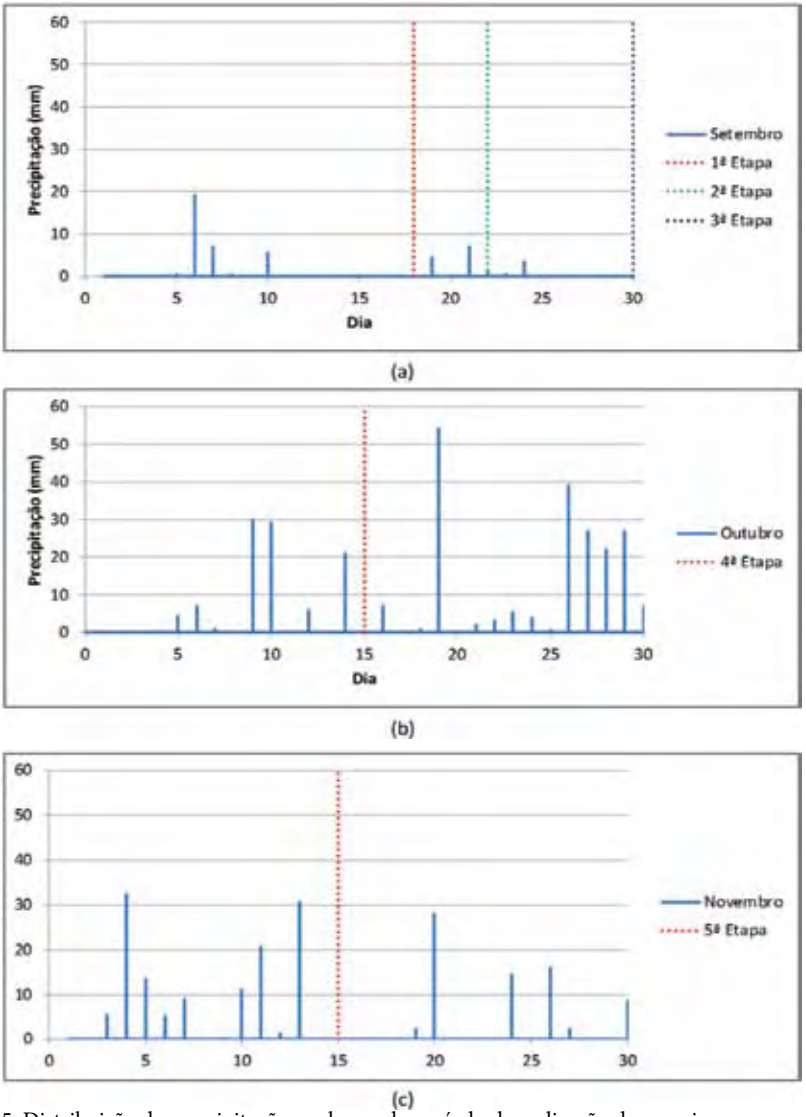


Figura 5. Distribuição das precipitações ao longo do período de realização dos ensaios.

A Figura 6 ilustra, com os resultados obtidos na primeira etapa, os perfis de umidade obtidos antes e após as cinco etapas de ensaio de infiltração. Os resultados permitiram verificar, observando-se os perfis de umidade mais distantes do furo de infiltração (RESTREPO, 2010), que até a terceira etapa de ensaio as precipitações ocorridas não haviam afetado o perfil de umidade. Verificou-se, ainda, que na quarta etapa apenas o ponto mais superficial do perfil apresentou aumento de umidade em relação ao início da série de ensaios. Já para a quinta e última etapas do ensaio realizadas em 15 de novembro de 2009, todo o perfil de solo havia sofrido aumento de umidade devido às precipitações pluviométricas (Figura 7). Verificou-se, ainda, que apenas para a distância de 0,5 m do ponto de ensaio a umidade do perfil de solo sofreu influência perceptível da infiltração, como ilustra a Figuras 6.

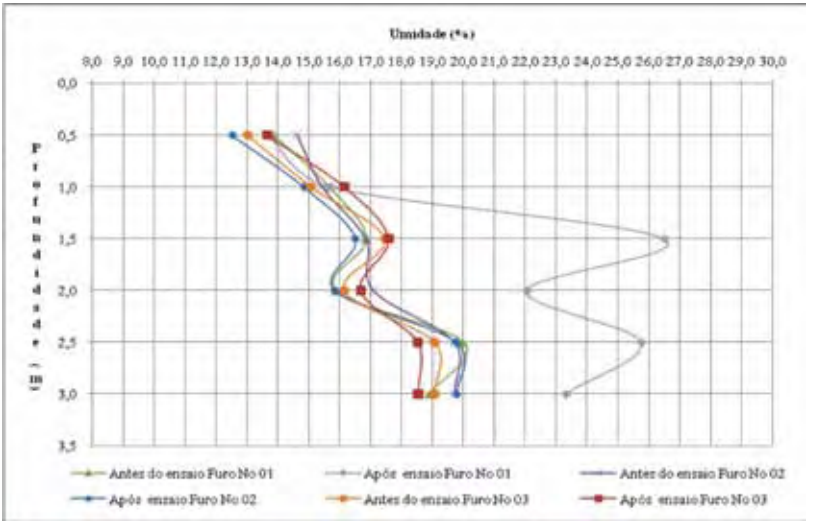

Umidade (%)
8,0 9,0 10,0 11,0 12,0 13,0 14,0 15,0 16,0 17,0 18,0 19,0 20,0 21,0 22,0 23,0 24,0 25,0 26,0 27,0 28,0 29,0 30,0
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
Profundidade (m)
Antes do ensaio Furo No 01
Após ensaio Furo No 01
Antes do ensaio Furo No 02
Após ensaio Furo No 02
Antes do ensaio Furo No 03
Após ensaio Furo No 03

Figura 6. Perfis de umidade obtidos para a 1ª Etapa de ensaio.

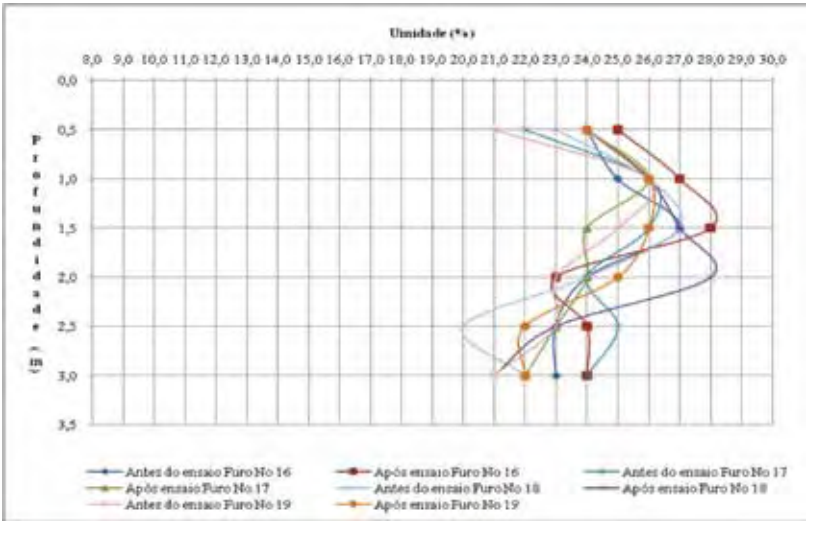

Umidade (%)
8,0 9,0 10,0 11,0 12,0 13,0 14,0 15,0 16,0 17,0 18,0 19,0 20,0 21,0 22,0 23,0 24,0 25,0 26,0 27,0 28,0 29,0 30,0
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
Profundidade (m)
Antes do ensaio Furo No 16
Após ensaio Furo No 16
Antes do ensaio Furo No 17
Após ensaio Furo No 17
Antes do ensaio Furo No 18
Após ensaio Furo No 18
Antes do ensaio Furo No 19
Após ensaio Furo No 19

Figura 7. Perfis de umidade obtidos para a 5ª Etapa de ensaio.

As avaliações do comportamento da umidade do solo frente à infiltração são importantes, pois as condições iniciais de umidade do solo afetam a infiltrabilidade, como se verá mais adiante. Então, para uma visão mais geral das variações de umidade, recorreu-se à geoestatística como ferramenta auxiliar, visto que ela permite estabelecer um modelo de semivariograma que melhor descreve a variabilidade espacial dos dados usando processo de interpolação. É importante que o modelo ajustado represente a tendência da semivariância em relação à distância, sendo a *krigagem* o método de interpolação adotado (JOHANN *et al*., 2004).

Para aplicação desse método de interpolação foi utilizado o programa *Surfer 8* (*Golden Software Inc*). O Surfer é um programa de mapeamento georreferenciado de superfície em 3D (tridimensional) e de contorno, desenvolvido pela *Golden Software*, que cria ou importa arquivos para que sejam internamente processados. Por se tratar de espacialização de dados, os arquivos originais do *Surfer* são do tipo tabelas em formato Excel ou equivalente, possuindo sempre três colunas de variáveis, XYZ. Convencionalmente, as duas primeiras colunas, X e Y, referem-se sempre às coordenadas da posição geográfica e a terceira à variável profundidade Z, alvo da espacialização. Esses arquivos são importados e visualizados inicialmente em uma folha de trabalho "*Worksheet*", na qual os dados são gerados e convertidos para o formato "*.dat*" da *Golden Software Data*. Posteriormente, dentro do módulo Grid ⇒ Data, é gerada uma *grade* por meio de métodos estatísticos, convertendo, assim, o arquivo para o formato específico tipo "*.grd*" .

A Figura 7 apresenta, para as cinco etapas de ensaios realizados, os gráficos de distribuição das umidades antes e após os ensaios de infiltração. Na Figura 8, estão os gráficos das distribuições das sucções estimadas a partir das curvas características de retenção de água. Em ambas as figuras, os dados apresentados à esquerda do furo correspondem à situação antes do ensaio, e os valores à direita correspondem aos dados após o ensaio de infiltração. Nas análises que se seguem, como não se admitiram variações da porosidade do solo em função da infiltração, tem-se que a distribuição espacial das sucções é reflexo direto da espacialização obtida para as umidades e, portanto, as discussões sobre estas seguem o mesmo caminho da que se faria sobre aquelas. Faz-se necessário apenas lembrar que ao aumento da umidade corresponderá uma diminuição da sucção, não sendo linear a relação entre esses dois parâmetros, ou seja, uma figura não é exatamente o espelho da outra, mas, em termos de tendência geral, têm-se os mesmos comportamentos.

Na análise dos gráficos contidos nessas figuras, faz-se necessário apreciar o efeito da precipitação e do intervalo de tempo decorrido entre uma etapa e outra do ensaio. Em termos de precipitação, até a primeira etapa de ensaio realizada no dia 18/09/2009, havia ocorrido no mês de agosto 73 mm de precipitação e no mês de setembro mais 33 mm, totalizando no mês que antecedeu ao ensaio 106 mm de precipitação. Entre a primeira e a segunda etapas, com intervalo de tempo de três dias entre elas, ocorreram apenas 13 mm de precipitação. Verifica-se, assim, de modo coerente, comparando-se as Figuras 7a e 7b, que a umidade do maciço foi alterada quase que apenas pela infiltração ocorrida na primeira etapa. Observa-se que, no intervalo de tempo entre as duas etapas, ocorreu pequeno espraiamento da umidade no solo devido à atuação dos gradientes de poropressão negativa e da gravidade. Observa-se também que se gerou, quando da primeira etapa, certo umedecimento na parte inferior da região do maciço considerado nas análises. Devido à proximidade entre o primeiro e o se-

gundo experimento, proporcionando pouca variação de umidade na região próxima ao furo de ensaio e provavelmente também devido a certa heterogeneidade do maciço, sobressai na Figura 7b que o solo teria, após o segundo teste, perdido umidade. O fato deve ser entendido como uma dispersão espacial da umidade e a preferência vertical estabelecida pelo fluxo. Por consequência, a esses aumentos de umidade corresponderam reduções na sucção (Figura 8a para 8b).

Quando da terceira etapa (Figuras 7c e 8c), realizada sete dias após a segunda etapa, ocorreram apenas mais 5 mm de precipitação, ou seja, as variações de umidade no maciço se deram quase que tão somente devido a redistribuições por ação dos diferenciais de poropressão existentes. Verifica-se, então, que devido a esse efeito ocorreram, entre as duas etapas, o espraiamento e certo avanço em profundidade da frente de umedecimento. Com isso, ocorreu o aumento da sucção próximo ao furo de infiltração entre o término da segunda etapa e o início da terceira. Esta observação é importante, pois, como se observa na Figura 10, esse comportamento eleva a taxa de infiltração no início do ensaio.

Ao se realizar a quarta etapa (Figuras 7d e 8d), 15 dias após a terceira, haviam ocorrido mais 99 mm de precipitação, valor que pode ser considerado irrisório em termos de balanço hídrico para esse período de elevadas temperaturas. Com isso, mais uma vez as variações de umidade registradas entre a terceira e a quarta etapa se devem quase que tão somente a redistribuições oriundas dos gradientes de sucção gerados com as infiltrações anteriores. Observa-se que a redistribuição gerou uma espécie de estrangulamento junto à ponta do furo, ponto extremo de atuação da pressão atmosférica. Cabe lembrar que, entre uma etapa e outra de ensaio, o furo usado para infiltração era apenas lacrado na superfície, sendo, portanto, possível certa troca de umidade e energia com a atmosfera. Certamente essa diferença de umidade e, portanto, de sucção, entre a região próxima à ponta e a da lateral do furo de infiltração, propiciará em termos de energia certo diferencial no potencial de infiltração entre a lateral e o fundo do furo de ensaio.

É importante destacar que, até a realização da quarta etapa de ensaio inclusive, praticamente não ocorreu umedecimento da camada mais superficial do perfil (1 m nas duas primeiras etapas e 0,50 m na terceira e na quarta). Esta observação é importante, pois aponta para a menor possibilidade, nesse tipo de solo profundamente intemperizado, de a infiltração por meio de poços e trincheiras vir a afetar estruturas rasas como fundações superficiais e pavimentos. É importante ressaltar, no entanto, que tal observação não pode ser generalizada. Fatores como as propriedades do solo, as dimensões e a forma da estrutura de infiltração podem afetar a distribuição espacial da umidade. Solos com valores de entrada de ar maiores, por exemplo, podem apresentar maior variação de umidade na superfície, pois apresentam maior ascensão capilar.

Entre a quarta (Figuras 7d e 8d) e a quinta etapas (Figuras 7e e 8e), decorreu um intervalo de tempo de um mês. Até a data do ensaio, ocorreram, entre as duas etapas, 328 mm de precipitação. Esse volume significativo de precipitação promoveu o umedecimento do maciço como um todo com a frente de avanço da umidade situando-se um pouco abaixo do furo de ensaio. Com isso, praticamente perdeu-se o efeito da influência do intervalo de tempo decorrido entre as duas últimas etapas, mesmo assim aparecendo certa influência próxima à base do furo.

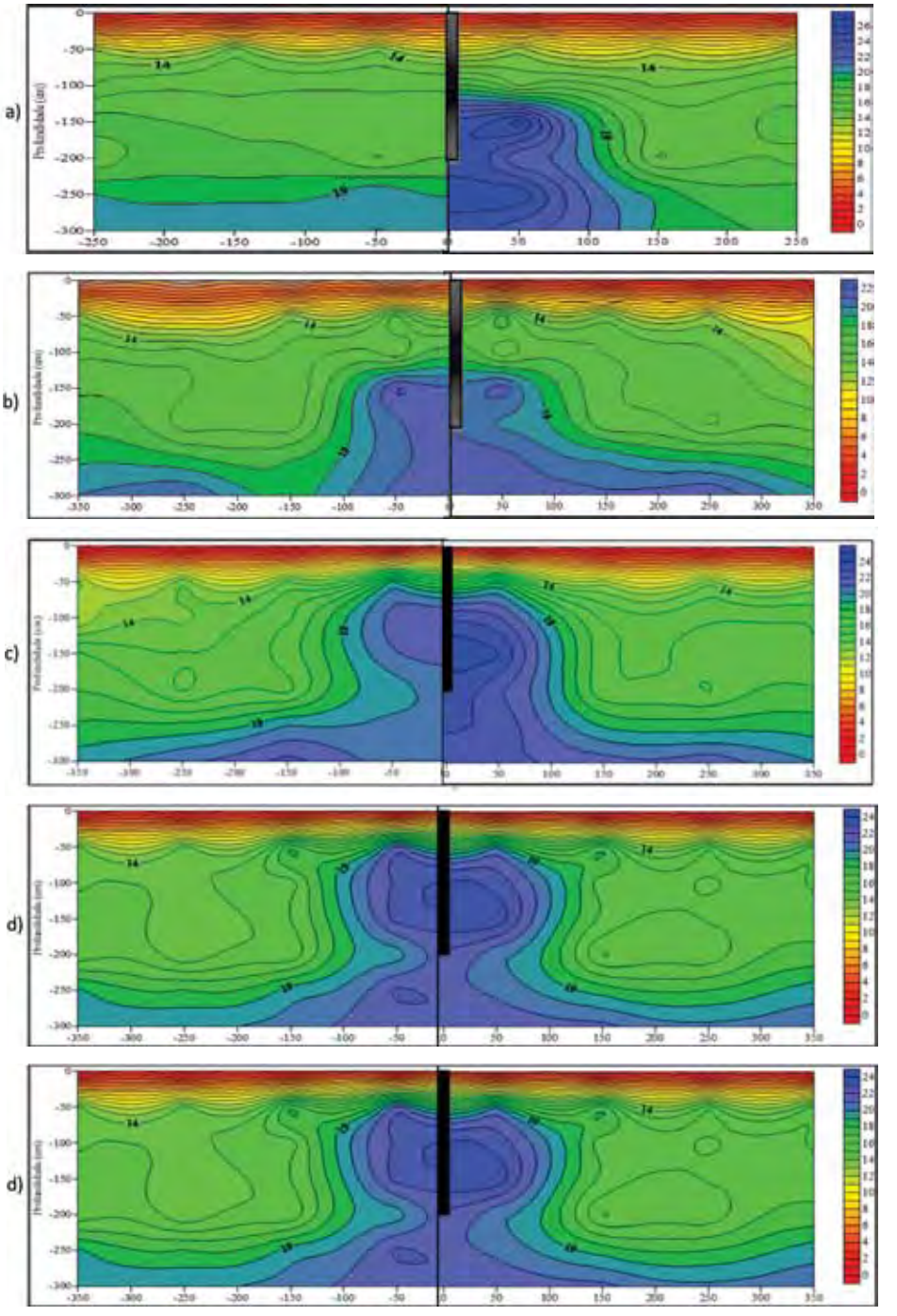


Figura 7. Síntese da distribuição espacial da umidade: a) 18/09/2009; b) 22/09/2009; c) 30/09/2009; d) 15/10/2009; e) 15/11/2009.

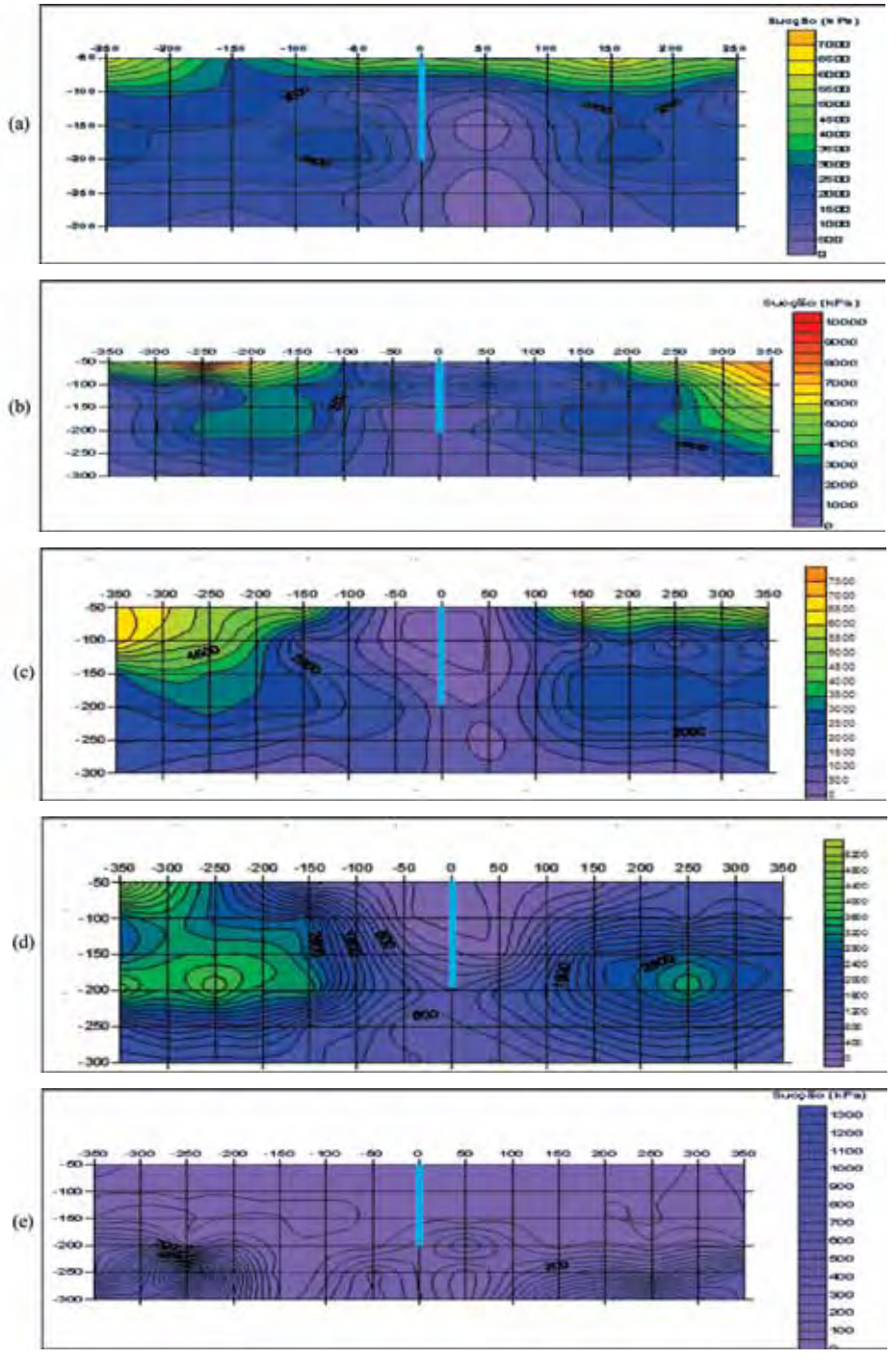


Figura 8. Síntese da distribuição espacial da sucção: a) 18/09/2009; b) 22/09/2009; c) 30/09/2009; d) 15/10/2009; e) 15/11/2009.

As curvas características de retenção de água mostradas na Figura 9 colocam em evidência a distribuição de poros bimodal para o perfil de solo nas profundidades ensaiadas. Essa estrutura é marcada por microporos no interior dos agregados e macroporos entre eles. É por esses macroporos que geralmente se dá o fluxo. Observa-se nesta figura que o término de entrada de ar nos macroporos se dá para aproximadamente 45% de grau de saturação e que a entrada de ar se dá para aproximadamente 28% de grau de saturação, ou seja, os poros intermediários não são muito significativos e o volume de macroporos é importante.

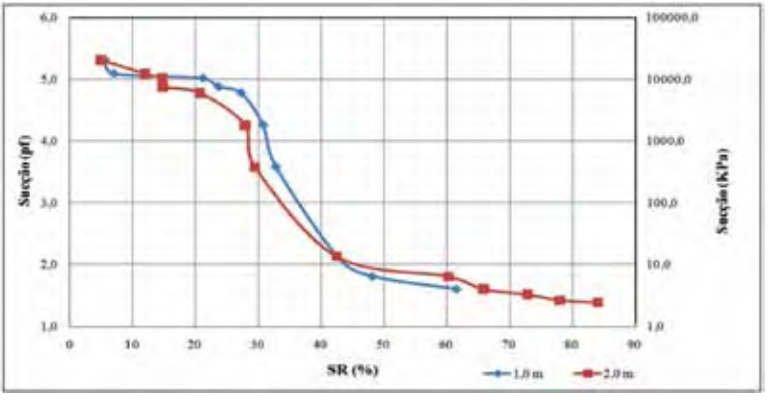


Figura 9. Curvas características obtidas para o perfil de solo estudado.

Após essa análise espacial, torna-se mais fácil discutir os resultados de infiltração propriamente ditos. Cabe lembrar que os ensaios de infiltração foram realizados permitindo rebaixamentos de 30 cm no nível d'água com medidas do tempo de ensaio a cada 5 cm. Ao se atingir os 30 cm de rebaixamento, novo ciclo de ensaio era iniciado, prosseguindo-se com o experimento até que o último ciclo tendesse à estabilização em relação ao penúltimo. Os resultados mostram que, para a primeira etapa, essa estabilização requereria maior tempo de ensaio que o adotado.

A Figura 10 apresenta os resultados de taxa de infiltração obtidos nas etapas de ensaio em função do tempo acumulado em cada uma delas. Se associados esses resultados à localização dos ensaios no contexto das distribuições de umidade (Figura 7) e sucção (Figura 8), torna-se possível verificar que o estado inicial do solo interfere diretamente na taxa de infiltração. Observa-se, por exemplo, que praticamente não se chegou à estabilização da taxa de infiltração no primeiro ensaio, tendo em vista o perfil encontrar-se muito ressecado. Já no segundo ensaio, realizado apenas três dias depois do primeiro, como o solo já se encontrava pré-umedecido, a estabilização se deu em curto espaço de tempo. No caso da infiltração da água da chuva a partir da superfície, é necessário que se leve ainda em conta o efeito tamponador e desagregador da frente gasosa sob pressão que se forma no contato com a frente de saturação (CAMAPUM DE CARVALHO, 2011).

A taxa de infiltração inicial depende diretamente da coluna d'água no interior do furo (energia externa aplicada) e da sucção próxima ao furo (energia interna atuante). Nos ensaios, a energia externa aplicada era a mesma, mesma coluna d'água inicial, porém, a interna variou de etapa para etapa. Assim, comparando-se os resultados iniciais de taxa de infiltração obtidos para a primeira etapa com os oriundos da segunda, percebe-se que, na primeira, os

valores são muito superiores aos da segunda. Como as precipitações entre a segunda e a terceira etapa foram pequenas, verifica-se que as redistribuições de umidade ampliando a sucção próxima ao furo de ensaio propiciaram um novo aumento da taxa de infiltração inicial quando se realizou a terceira etapa. Entre a terceira etapa e as demais praticamente não se verificam variações nas taxas de infiltração iniciais. Pode-se ainda considerar, com base nos resultados da Figura 10, que, quando da estabilização, as taxas de infiltração tendem a se repetir nas diferentes etapas, exceto para primeira, pois, como mostram os resultados, sua estabilização ainda não tinha sido atingida. Isso ocorre por dois motivos: o primeiro é que a energia externa é a mesma em todas as etapas, e o segundo é que o gradiente de energia devido à sucção tende a zero à medida que avança a frente de saturação, fazendo desaparecer o seu efeito.

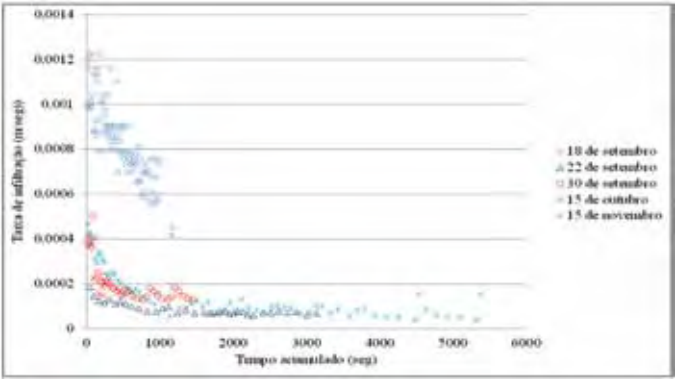


Figura 10. Taxa de infiltração de um perfil de intemperismo do DF (CAMAPUM DE CARVALHO 2011; RESTREPO 2010).

A Figura 11 apresenta os resultados de grau de saturação calculados com base nas umidades ao final de cada etapa de ensaio e considerando-se os valores de índice de vazios apresentados por Guimarães (2002). Comparando-se os resultados desta figura aos da Figura 8, verifica-se que, quando da constância da taxa de infiltração registrada na Figura 10, o grau de saturação (Sr) do perfil de solo corresponde, considerando-se o entendimento firmado por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), aproximadamente ao grau de saturação onde termina a zona de macroporos na curva característica (Figura 9), ou seja, a zona onde os macroporos estão submetidos a baixos valores de sucção.

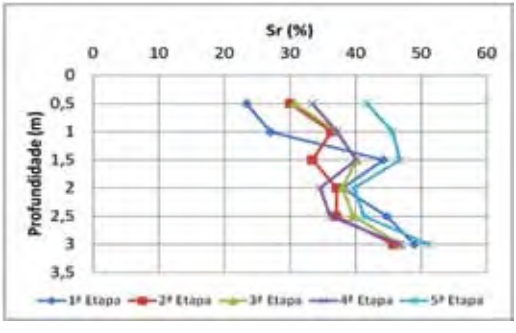


Figura 11. Perfis de grau de saturação (Sr) ao final das etapas de ensaio.

4 Considerações finais

Diante das análises apresentadas neste capítulo, é possível estabelecer que, nos projetos de infiltração envolvendo poços e trincheiras, estes dispositivos, em geral, atuam, inicialmente, devido às sucções iniciais mais elevadas atuantes no maciço, absorvendo um maior volume de água, mas em seguida esse volume de água por unidade de tempo diminui, tendendo para a taxa de infiltração registrada ao final dos ensaios de infiltração. Com isso, é possível apontar como diretriz de critério de dimensionamento o uso da taxa de infiltração registrada após a estabilização. O mesmo entendimento deve ser dado nos estudos de infiltração relativos às análises dos processos de alagamento e inundação que assolam várias regiões brasileiras.

As ações preventivas voltadas para o desenvolvimento sustentável passam quase sempre por processos de infiltração compensatórios, fazendo sobressaírem em importância os estudos aqui realizados.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. (1996). Ensaios de permeabilidade em solos – orientações para sua execução no campo. 3. ed. São Paulo, Boletim n° 4, 35 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2011). Os solos não saturados no contexto de alguns problemas socioambientais no Brasil. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7, Pirenópolis. Anais... Goiânia: Editora Kelps. v. 1, p. 419-429.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEROUEIL, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas. Revista Brasileira de Geotecnia, São Paulo, SP, v. 27, n. 3, p. 231-242.

GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Brasília: UnB. 183 p. G.DM – 090ª/02. Dissertação(Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: em: http://www.inmet.gov.br. Acesso em: 17 de março de 2012.

JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U.; SOUZA, E. G.; ROCHA, J. V. (2004). Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., v.8, p. 212-219.

RESTREPO, J. M. S. (2010). Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Brasília: UnB. 183 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM - 188/10.

SILVA, J. P.(2007). Estudos preliminares para a implantação de trincheiras de infiltração. Distrito Federal. Brasília: UnB. 155 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Publicado G.DM-154/07, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Capítulo 13

Modelos teóricos de infiltração em meios porosos: equação de Richards e suas aplicações

André Luís Brasil Cavalcante
Luan Carlos de Sena Monteiro Ozelim
Pushpa Narayan Rathie
Prabhata Kumar Swamee

1 Introdução

O pleno entendimento do fluxo de fluidos em meios porosos é um dos maiores desafios da atual ciência do solo. Em um primeiro momento, o fluido de maior interesse era a água. Há cerca de um século, Lorenzo A. Richards consolidou os esforços de gerações anteriores de estudiosos do solo – notavelmente Franklin H. King, Charles S. Slichter, Lyman J. Briggs, Edgar Buckingham, Willard Gardner e W.B. Haines – ao propor uma teoria macroscópica que descrevia o movimento de água em solos não saturados (RAATS, 2001). A teoria de Richards encontra respaldo em vários ramos da mecânica do contínuo ao combinar o mais simples balanço de massa, expresso por meio da equação da continuidade, com o balanço de momento, expresso pela lei de Darcy (RAATS, 2001).

Pode-se dizer que, para a engenharia contemporânea, ainda que a aplicabilidade e robustez de modelos numéricos tenham se expandido e consolidado, a busca por soluções analíticas da equação de Richards continua em voga, haja vista que a validação é uma etapa imprescindível na avaliação de rotinas numéricas. Por outro lado, fenômenos complexos, como fluxo multifásico, têm intrigado cientistas, levando-os a buscar novas soluções da referida equação.

Particularmente, o processo de infiltração recebeu grande atenção nos últimos anos, principalmente devido à necessidade de se avaliar a conservação do solo, prever enchentes e projetar sistemas de irrigação e drenagem. Além disso, sabe-se que, ao se potencializar o processo de infiltração, uma melhora significativa em relação à ocorrência de erosão e recarga dos aquíferos é alcançada (CECÍLIO *et al.*, 2007).

Com o mesmo efeito sobre outros processos que ocorrem no solo, tanto a anisotropia quanto a heterogeneidade da matriz porosa tornam o processo de infiltração real sobremaneira complexo. Observa-se, por outro lado, que pesquisadores têm proposto uma grande variedade de modelos cujos resultados mostram grande correspondência com a realidade.

A necessidade de desenvolvimento de métodos experimentais mais precisos acompanhou a criação dos referidos modelos. Há cerca de trinta e cinco anos, já estavam disponíveis métodos variados para aferição de parâmetros de entrada como teor volumétrico de água e potencial hidráulico (RAATS, 2001).

O teor volumétrico era medido não apenas gravimetricamente, mas também por meio de métodos fundamentados no espalhamento de nêutrons e absorção de raios gama. De ma-

neira geral, melhoras significativas foram alcançadas com o avanço da eletrônica e dos sistemas de aquisição de dados. A grande evolução dos instrumentos nos últimos anos se deu associada ao desenvolvimento de aferidores dielétricos, os quais permitem inferir não apenas o teor volumétrico, mas também a concentração de eletrólitos em solução (RAATS, 2001).

Os equipamentos de tensiometria passaram de medidores de vácuo e tubos em U preenchidos com água ou mercúrio a transdutores elétricos, permitindo, assim, o desenvolvimento de microtensiômetros de resposta rápida. A partir do aumento de precisão dos transdutores de pressão e dos *dataloggers*, a sensibilidade das aferições em relação a perturbações pode agora ser avaliada (RAATS, 2001).

Com o intuito de contribuir para a avaliação numérico-analítica das equações de infiltração, o presente capítulo tem o objetivo de analisar a dedução e avaliação de alguns dos mais utilizados modelos, quais sejam: Green-Ampt e Talsma-Parlange. Além disso, a equação de infiltração de três parâmetros proposta por Parlange *et al.* (1982) também será estudada em detalhes. De maneira simplificada, o último modelo é uma interpolação entre os modelos de Green e Ampt (1911) e de Talsma e Parlange (1972).

2 Equação de Richards

Derivada por Richards (1931), a equação que governa o movimento de água em solos não saturados pode, em princípio, ser escrita como função do teor de umidade volumétrico do solo ou de seu potencial matricial. Ou seja, pode-se, de maneira simples, manipular a equação para que a variável dependente se torne um dos dois parâmetros citados. Em termos do potencial matricial, a equação unidimensional de Richards toma a seguinte forma (BARRY *et al.*, 1993):

$$\frac{d\theta_w}{d\Psi}\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\Psi)\frac{\partial\Psi}{\partial z} - K(\Psi)\right] \quad (1)$$

em que t_* é o teor de umidade volumétrico do solo (L^3/L^3), K é a condutividade hidráulica do solo (L/T), Ψ é o potencial matricial (L) e z é a coordenada vertical (L) com origem na superfície do solo e sentido positivo descendente. Sabe-se que a Equação tem como premissas a homogeneidade do solo e o movimento isotérmico de água como fluido incompressível. Além disso, a matriz porosa é considerada rígida. Considera-se também que o ar presente tem efeito desprezível no fluxo de água. Finalmente, admite-se que não há histerese nas características de interesse.

Utiliza-se, no presente capítulo, uma função especial sobremaneira importante, a função W de Lambert. Segue, pois, uma breve introdução a essa função.

3 Função W de Lambert

O princípio de Pareto estabelece que, para fenômenos das mais diversas naturezas, cerca de oitenta por cento das consequências é resultado de apenas vinte por cento das causas. De fato, sob o prisma das ciências exatas, a lógica descrita é facilmente aplicada. Exemplificando, observa-se de maneira geral que do tempo empregado na elaboração de um artigo ou teoria

grande parte é consumida ao se pensar nos pilares da nova ideia e em sua descrição, enquanto relativamente pouco é necessário para descrever textual ou matematicamente o que se tem em mente.

De maneira mais específica, reaplicando o princípio à descrição matemática necessária ao desenvolvimento da referida ideia, pode-se esperar que metodologias mais simples tendam a ser responsáveis por grande parte do processo de solução. Novamente, isso se verifica em qualquer trabalho científico.

Em especial, considere-se a seguinte equação:

$$we^{w} = x, x \in [-1/e, \infty) \tag{2}$$

É intuitivo que funções simples tenham equações funcionais também simples. Por exemplo, a função de potência pode ser facilmente representada como solução da equação funcional $f(a) f(b) = f(a + b)$. Ao avaliar a Equação , naturalmente se imagina que, caso exista uma função w que a satisfaça, tal função deve ser simples como o é a equação.

Segundo os esforços de Euler e Lambert, há de fato uma função $W(x)$ que satisfaz a Equação (2) e cuja denominação, em homenagem ao último, é função W de Lambert. De maneira formal, pode-se definir a função W de Lambert para uma variável real x como (CORLESS *et al.,* 1996):

$$W(x)e^{W(x)} = x, x \in [-1/e, \infty) \tag{3}$$

Nota-se que para $x \in [-1/e, 0]$ há dois valores reais possíveis para $W(x)$, quais sejam: $W_0(x)$ denota o ramo em que $W(x) \geq -1$ enquanto $W_{-1}(x)$ denota o ramo em que $W(x) < -1$. Por simplicidade de notação, a função W de Lambert será referida como função W. A Figura 1 mostra o comportamento da função assim como seus ramos representados por linha cheia ($W_0(x)$) e linha tracejada ($W_{-1}(x)$).

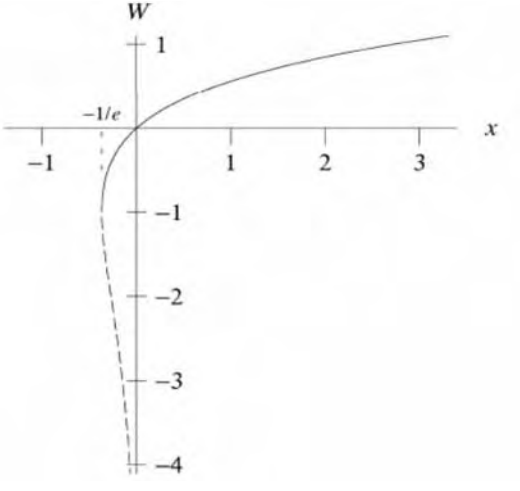


Figura 1. Função W de Lambert.

No presente capítulo, a função W será utilizada na solução de equações de infiltração de maneira analítica exata, conforme se pode ver subsequentemente.

4 Função W de Lambert e a equação de Green-AMPT

A proposição de descrição matemática feita por Green e Ampt (1911) figura como um dos mais explorados modelos de infiltração. Em resumo, foi deduzida a partir da Equação de Darcy e de outras hipóteses, como a existência de uma carga hidráulica constante na superfície do solo durante todo o processo de infiltração. O teor volumétrico de água da zona de transição (θ_t) atinge o valor saturado (θ_s); logo, a condutividade hidráulica na referida zona (K_t) é equivalente ao valor saturado (K_s) e há a formação de uma frente de molhagem horizontal bem definida, caracterizando o movimento da água como um pistão (ZONTA *et al*., 2010).

Considera-se, no presente estudo, em vez da taxa de infiltração, a lâmina de infiltração acumulada. Dessa maneira, a integração da equação da taxa de infiltração de Green-Ampt foi dada por Mein e Farrel (1974) como:

$$t_* = I_* - \ln\left(1 + I_*\right) \tag{4}$$

A Equação (4) tem variáveis adimensionais dadas por t_*, que é o tempo adimensional, e $I_* \geq$, representando a lâmina acumulada adimensional. Vale notar que a dimensionalização das variáveis de interesse será discutida em momento fortuito.

Note-se que, após uma breve manipulação algébrica, a Equação (4) pode ser reescrita como:

$$\exp\left[-(1+t_*)\right] = (1+I_*)\exp\left[-(1+I_*)\right] \tag{5}$$

A partir da comparação entre as Equações (3) e (5), pode-se dizer que:

$$W\left(-\exp\left[-\left(1+t_*\right)\right]\right) = -\left(1+I_*\right) \tag{6}$$

Note-se que o único ramo de *W* que se adapta à Equação (5) é o ramo -1, haja vista que, como $I_* \geq 0$, o lado direito da Equação (6) é sempre menor que -1. Dessa maneira:

$$I_* = -1 - W_{-1}\left(-\exp\left[-\left(1+t_*\right)\right]\right) \tag{7}$$

Em acordo com a solução apresentada por Parlange *et al.* (2002), a Equação (7) representa de maneira exata a solução da equação adimensional de Green-Ampt por meio da função W.

5 Função W de Lambert e a equação de Talsma-Parlange

Estudos experimentais levam a crer que as situações de campo estão limitadas por dois comportamentos limites (PARLANGE *et al.*, 2002). O primeiro é observado quando o solo segue uma lei de infiltração matematicamente descrita pela Equação (4) de Green-Ampt, discutida anteriormente. O outro limite é dado quando o solo se comporta segundo a formulação proposta por Talsma e Parlange (1972). As hipóteses dedutivas de ambos os modelos de Green-Ampt e Talsma-Parlange são semelhantes, sendo a maior diferença o fato de o último considerar que há uma relação de proporcionalidade entre a difusividade do solo (*D*) e $I_* \geq I_d = t_*$, enquanto o primeiro assume uma difusividade de rápida variação e uma condutividade

hidráulica quase constante (PARLANGE *et al*., 2002). A equação que relaciona a lâmina infiltrada adimensional com o tempo adimensional, para o caso de Talsma-Parlange, é expressa por (TALSMA e PARANGE, 1972):

$$t_* = I_* + \exp(-I_*) - 1 \tag{8}$$

Da mesma maneira que se procedeu com a Equação (4), após manipulações algébricas, a Equação (8) pode ser reescrita como:

$$(I_* - t_* - 1)\exp(I_* - t_* - 1) + \exp(-t_* - 1) = 0 \tag{9}$$

A comparação entre as Equações (3) e (9) fornece:

$$W(-\exp(-t_* - 1) = (I_* - t_* - 1) \tag{10}$$

Por inspeção da Equação (10), é visível que dois casos de solução são possíveis, quais sejam: quando $I_* > t_*$, o ramo correspondente é o ramo 0; por outro lado, quando $I_* < t_*$, a solução se encontra no ramo -1. Há que se avaliar o comportamento das funções I_*, dada pela Equação (8), e da função identidade $I_d = t_*$. Considere-se, assim, a derivada implícita da Equação (8) em relação a t_*:

$$1 = \frac{dI_*}{dt_*} - \exp(-I_*)\frac{dI_*}{dt_*} \Rightarrow \frac{dI_*}{dt_*} = \frac{1}{1 - \exp(-I_*)} > 1 \tag{11}$$

Note-se que a derivada na Equação (11) é sempre maior do que um. A função expressa implicitamente na Equação (11) tem seu crescimento sempre mais rápido que a função identidade; assim, caso haja um ponto de igualdade entre as duas funções, a partir deste a função dada na Equação (11) será sempre maior que a identidade. Sabe-se, no entanto, que o único ponto de igualdade no intervalo $I_* \geq 0$ é seu limite inferior, ou seja, quando $I_* = 0$. Dessa forma, pode-se dizer que $I_* \geq I_d = t_*$, e o único ramo possível é o ramo 0. Finalmente, o resultado, que está em consonância com aquele obtido por Parlange *et al.* (2002), é:

$$I_* = W_0\left(-\exp(-t_* - 1)\right) + t_* + 1 \tag{12}$$

De modo semelhante ao caso de Green-Ampt, a equação de Talsma-Parlange tem sua solução exata em termos da função especial W de Lambert.

6 Função W de Lambert e a equação de Richards

Há uma vasta gama de métodos de solução de equações diferenciais parciais, dentre os quais cabe citar a aplicação de transformadas integrais, aplicação de transformação de variáveis, utilização de integração direta, aplicação de séries, entre outros. No presente esforço, uma abordagem mista de transformação de variáveis e de integração direta, semelhante à adotada por Barry *et al.* (1993), será utilizada.

Barry *et al.* (1993) adotaram algumas premissas simplificadoras em sua dedução de maneira a inviabilizar a aplicação de sua solução a outros casos de interesse. Por outro lado, uma abordagem mais ampla será dada à questão, de maneira que a solução de Barry *et al.* (1993) será um caso particular do resultado aqui apresentado.

Ao se avaliarem as derivadas da equação unidimensional de Richards, Equação (1), pode-se desenvolver até chegar a:

$$\frac{d\theta_w}{dK}\frac{\partial}{\partial\Psi}\left[\ln(K(\Psi))\right]\frac{\partial\Psi}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial\Psi}\left[\ln(K(\Psi))\right]\frac{\partial\Psi}{\partial z}\left[\frac{\partial\Psi}{\partial z}-1\right]+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} \tag{13}$$

Sabe-se que uma das maneiras mais corriqueiras de se solucionar a equação de Richards é por meio da transformada de Boltzmann. Neste capítulo, utilizar-se-á a transformada de Boltzmann generalizada, definida por:

$$\phi(z,t)=\frac{f(z)}{g(t)} \tag{14}$$

A partir da definição da transformada dada pela Equação (14) e do fato de que Ψ é função de *z* e de *t*, podem-se obter as seguintes relações:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\Psi}{\partial z}&=\frac{d\Psi}{d\phi}\left[\frac{df(z)}{dz}\frac{1}{g(t)}\right]\\
\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}&=\frac{d^2\Psi}{d\phi^2}\left[\frac{df(z)}{dz}\frac{1}{g(t)}\right]^2+\frac{d\Psi}{d\phi}\left[\frac{d^2f(z)}{dz^2}\frac{1}{g(t)}\right]\\
\frac{\partial\Psi}{\partial t}&=-\frac{d\Psi}{d\phi}\left[\frac{dg(t)}{dt}\frac{f(z)}{g(t)^2}\right]
\end{aligned} \tag{15}$$

Substituindo-se as relações da Equação (15) na Equação de Richards, descrita pela Equação (13), tem-se:

$$-\frac{d\theta_w}{dK}\frac{\partial}{\partial\Psi}\left[\ln(K(\Psi))\right]\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{dg(t)}{dt}f(z)=\frac{\partial}{\partial\Psi}\left[\ln(K(\Psi))\right]\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{df(z)}{dz}\left[\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{df(z)}{dz}-g(t)\right]+g(t)^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} \tag{16}$$

Ao se considerar por hipótese que a Equação (16) é simétrica, pode-se inferir a seguinte suposição com intuito de simplificar os cálculos:

$$g(t)^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}=0 \tag{17}$$

Das Equações (15) e (17) pode-se notar que:

$$-\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{d^2f(z)}{dz^2}g(t)=\frac{d^2\Psi}{d\phi^2}\left[\frac{df(z)}{dz}\right]^2 \tag{18}$$

A multiplicação e divisão do lado esquerdo da Equação (18) p1or $f(z)$ implicam em:

$$-\left[\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{1}{\phi}\right]\left[\frac{d^2f(z)}{dz^2}f(z)\right]=\frac{d^2\Psi}{d\phi^2}\left[\frac{df(z)}{dz}\right]^2 \tag{19}$$

A Equação (19), uma vez solucionada, possibilita, a partir da equação de Richards transformada, Equação (16), descrever todas as variáveis de interesse no problema de infiltração. Como a equação diferencial, Equação (19), é ordinária e separável, duas situações são possíveis.

6.1 Caso (i)

No primeiro caso, as equações a serem resolvidas são dadas por:

$$\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{1}{\phi}=\frac{d^2\Psi}{d\phi^2}$$
$$\frac{d^2 f(z)}{dz^2}f(z)=-\left[\frac{df(z)}{dz}\right]^2 \tag{20}$$

Por meio de técnicas elementares de resolução de equações diferenciais ordinárias, as soluções das equações na Equação (20) são:

$$\Psi=c_1+c_2\phi^2$$
$$f(z)=\pm\sqrt{c_3 z+c_4} \tag{21}$$

em que c_i são constantes de integração. Com o auxílio da Equação (21), a equação de Richardstransformada, Equação (16), reduz-se a:

$$-\left[\frac{d\theta_w}{dK}\phi^2\right]\left[\frac{dg(t)}{dt}g(t)\right]=\frac{c_3}{2}\left[\frac{c_2c_3}{g(t)^2}-1\right] \tag{22}$$

Notam-se, novamente, dois possíveis casos de solução.

6.1.1 Caso (i) a

Acontece quando o sistema a ser resolvido é:

$$-\left[\frac{d\theta_w}{dK}\phi^2\right]=\Xi$$
$$\frac{dg(t)}{dt}g(t)=\frac{1}{\Xi}\left(\frac{c_2c_3^2}{2g(t)^2}-\frac{c_3}{2}\right) \tag{23}$$

em que Ξ é uma constante arbitrária. Nesse caso, as soluções são dadas por:

$$\theta_w=-\Xi\int\frac{1}{\phi^2}dK+c_5=-\Xi\int\frac{c_2}{\Psi-c_1}\frac{dK}{d\Psi}d\Psi+c_5$$
$$g(t)=\pm\sqrt{\exp\left(-\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)+1+\frac{1}{\Xi c_2}t+\frac{c_6}{\Xi c_2}\right]\right)+c_2c_3} \tag{24}$$

Para a Equação (24), a determinação de qual ramo da função W é consistente, haja vista o grande número de constantes de integração, é sobremaneira complexa. Essa etapa é deixada para o momento em que se atribui significado físico aos parâmetros. Cabe ressaltar, por outro lado, que qualquer ramo da função W satisfaz a equação.

6.1.2 Caso (i) b

Acontece quando o sistema a ser resolvido é:

$$\left[\frac{d\theta_w}{dK}\phi^2\right] = \Xi$$
$$-\frac{dg(t)}{dt}g(t) = \frac{1}{\Xi}\left(\frac{c_2 c_3^2}{2g(t)^2} - \frac{c_3}{2}\right) \tag{25}$$

A solução para o conjunto de equações da Equação (25) pode ser dada ao adotar $-\Xi$ no lugar de Ξ na Equação (24). Da mesma forma observada para a Equação (24), a determinação de qual ramo da função W é coerente é de grande complexidade.

6.2 Caso (ii)

No segundo caso, as equações a serem resolvidas são dadas por:

$$\frac{d\Psi}{d\phi}\frac{1}{\phi} = -\frac{d^2\Psi}{d\phi^2}$$
$$\frac{d^2 f(z)}{dz^2} f(z) = \left[\frac{df(z)}{dz}\right]^2 \tag{26}$$

Da mesma forma que se procedeu para as Equações (23) e (25), por meio da aplicação de técnicas de resolução de EDOs, as soluções das equações na Equação (26) podem ser dadas por:

$$\Psi = c_9 + c_{10}\ln(\phi)$$
$$f(z) = c_{11}\exp(c_{12}z) \tag{27}$$

Ao utilizar a Equação (27) em conjunto com a equação de Richards transformada Equação (16), pode-se obter:

$$-\frac{d\theta_w}{dK}\frac{dg(t)}{dt}\frac{1}{g(t)} = c_{12}\left[c_{10}c_{12} - 1\right] \tag{28}$$

Mais uma vez, existem dois possíveis casos de solução.

6.2.1 Caso (ii) a

Configura-se quando o sistema a ser resolvido é:

$$-\frac{d\theta_w}{dK} = \Gamma$$
$$\frac{dg(t)}{dt}\frac{1}{g(t)} = \frac{c_{12}\left[c_{10}c_{12} - 1\right]}{\Gamma} \tag{29}$$

Nesse caso, as soluções são dadas por:

$$\theta_w = -\Gamma\int dK + c_{13} = -\Gamma K + c_{13}$$
$$g(t) = c_{14}\exp\left(\frac{c_{12}(c_{10}c_{12} - 1)}{\Gamma}t\right) \tag{30}$$

É ainda válida a consideração feita anteriormente em relação à obtenção dos ramos de interesse.

6.2.2 Caso (ii) b

Acontece quando o sistema a ser resolvido é:

$$\frac{d\theta_w}{dK} = \Gamma$$
$$\frac{dg(t)}{dt}\frac{1}{g(t)} = -\frac{c_{12}\left[c_{10}c_{12} - 1\right]}{\Gamma} \tag{31}$$

Para a obtenção das soluções da Equação (31), basta trocar Γ na Equação (30) por –Γ.

Para todos os casos de interesse, a Tabela 1 congrega os resultados. Os índices subscritos utilizados, por questão de organização, seguem a ordenação natural advinda do processo de solução aqui aplicado.

Nota-se que, até o presente momento, a solução apresentada acima está desprovida de sentido físico. Essa conotação de aplicação a casos reais pode ser dada ao avaliar as constantes de integração obtidas acima.

Quando se considera o fenômeno de infiltração, para que se possa obter a lâmina infiltrada, deve-se obter o fluxo de água, $q(z, t)$, passante no meio poroso. Dessa forma, a Lei de Darcy estabelece que, para a carga total H, dada por:

$$H = \Psi + z, \tag{32}$$

a equação que fornece o fluxo é descrita como:

$$q(z,t) = -K(H)\frac{\partial H}{\partial z} = -K(\Psi)\left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1\right) \tag{33}$$

O fluxo para todas as possíveis constantes de integração pode ser obtido ao se avaliar a Equação (33) com as variáveis apresentadas na Tabela 1. No entanto, para que não se estenda em demasia, o presente esforço considera apenas um caso cujo sentido físico é evidente. Para tanto, ao rearranjar a expressão do potencial matricial, Ψ, com base nas Equações (14), (21) e (24), para o caso (i) a, tem-se:

$$\Psi = c_1 + c_2 \frac{c_3 z + c_4}{c_2 c_3 \left[\exp\left(-\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1 - \frac{1}{\Xi c_2}t - \frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)\right]\right)\exp\left(-1 - \frac{1}{\Xi c_2}t - \frac{c_6}{\Xi c_2}\right) + 1\right]} \tag{34}$$

Nota-se claramente uma ligação entre a Equação (34) e a Equação (3) reescrita da seguinte maneira:

$$W(x) = xe^{-W(x)} \tag{35}$$

Isso implica, em última instância, na seguinte forma para o potencial matricial (Equação (34)):

$$\Psi = c_1 + c_2 \frac{c_3 z + c_4}{c_2 c_3 \left[W\left(\frac{\exp\left\{-1 - \frac{1}{\Xi c_2}t - \frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right) + 1\right]} \tag{36}$$

A partir das Equações (33) e (36), o gradiente hidráulico pode ser dado por:

$$\frac{q(z,t)}{K(\Psi)} = -\left\{\left[\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)+1\right]\right]^{-1}+1\right\} \tag{37}$$

Sabe-se, por outro lado, que o fluxo e a lâmina infiltrada acumulada podem são descritos pela seguinte relação (BARRY *et al.*, 1993):

$$I(t) = \int_0^t q(0,\lambda)d\lambda \tag{38}$$

Finalmente, a lâmina infiltrada acumulada pode ser dada por:

$$I(t) = \int_0^t K(\Psi(0,\tau))\left[1-\left\{\left[\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}\tau-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)+1\right]\right]^{-1}\right\}\right]d\tau \tag{39}$$

Como não se conhece, a princípio, a relação entre a condutividade hidráulica e o potencial matricial do solo, a Equação (39) não pode ser simplificada. No entanto, há na literatura um grande número de relações obtidas para essa correlação, podendo-se, a partir da combinação das últimas com a Equação (39), obter leis de infiltração distintas (SELKER *et al.*, 1999). A princípio, um caso simples, porém muito conhecido, será tratado.

Considera-se no presente esforço o caso em que a condutividade hidráulica na superfície, K_s, é constante no tempo, ou seja, $K_s = K(\Psi(0,\forall t))$. Dessa forma, a Equação (39) pode ser simplificada a:

$$I(t) = K_s t - K_s \int_0^t \left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}\tau-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)+1\right]^{-1} d\tau \tag{40}$$

Por meio de técnicas de integração, a lâmina infiltrada acumulada, Equação (40), pode ser reduzida a

$$I(t) = K_s t + K_s \Xi c_2\left(\ln\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)\right]+1-\ln\left(\frac{\exp\left\{-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)+W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)\right) \tag{41}$$

Ao combinar as Equações (35) e (41), obtém-se:

$$I(t) = K_s t + K_s \Xi c_2\left(\ln\left[\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\exp\left[-W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)\right]\right]\right) \tag{42}$$

$$+1-\ln\left(\frac{\exp\left\{-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)+W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)\Bigg)$$

ou ainda, manipulando-se os termos,

$$I(t)=K_s t+K_s\Xi c_2\left(-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}-\ln(c_2c_3)-W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)\right.$$
$$\left.+1-\ln\left(\frac{\exp\left\{-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)+W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)\right) \tag{43}$$

Finalmente, podem-se rearranjar os termos da Equação (43) e descrever a lâmina infiltrada acumula por:

$$I(t)=A-BW\left(\frac{\exp\left\{-\frac{1}{C}t-D\right\}}{c_2c_3}\right) \tag{44}$$

em que a seguinte troca de variáveis foi feita:

$$A=K_s\Xi c_2\left(-1-\frac{c_6}{\Xi c_2}-\ln(c_2c_3)+1-\ln\left(\frac{\exp\left\{-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)+W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2c_3}\right)\right)$$
$$B=K_s\Xi c_2 \tag{45}$$
$$C=\Xi c_2$$
$$D=1+\frac{c_6}{\Xi c_2}$$

Para que se possam comparar os resultados obtidos por meio da solução da equação de Richards com os resultados de Green-Ampt, considere-se a seguinte relação que fornece as variáveis dimensionais de tempo e lâmina acumulada (PARLANGE *et al.*, 2002):

$$t_*=\frac{K_s t}{(\Psi_w-p_s)(\theta_s-\theta_0)}$$
$$I_*=\frac{I}{(\Psi_w-p_s)(\theta_s-\theta_0)} \tag{46}$$

Tabela 1. Resultados para os Casos de Interesse.

Variáveis	**Casos de Interesse**			
	Caso (i)		*Caso (ii)*	
	Subcaso a	*Subcaso b*	*Subcaso a*	*Subcaso b*
Ξ	Ξ	$-\Xi$	–	–
Γ	–	–	Γ	$-\Gamma$
$f(z)$	$\pm\sqrt{c_3 z + c_4}$		$c_{11}\exp(c_{12} z)$	
$g(t)$	$\pm\sqrt{\exp\left(-\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)\right]\right)\exp\left(-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right)+c_2 c_3}$		$c_{14}\exp\left(\frac{c_{12}(c_{10}c_{12}-1)}{\Gamma}t\right)$	
Ψ	$c_1+c_2\frac{c_3 z+c_4}{\exp\left(-\left[W\left(\frac{\exp\left\{-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right\}}{c_2 c_3}\right)\right]\right)\exp\left(-1-\frac{1}{\Xi c_2}t-\frac{c_6}{\Xi c_2}\right)+c_2 c_3}$		$c_9+c_{10}\ln\left(\frac{c_{11}}{c_{14}}\right)+c_{10}\left(c_{12}z-\frac{c_{12}(c_{10}c_{12}-1)}{\Gamma}t\right)$	
θ	$-\Xi\int\frac{c_2}{\Psi-c_1}\frac{dK}{d\Psi}d\Psi+c_5$		$-\Gamma K+c_{13}$	

em que Ψ_w é o potencial matricial da frente de umedecimento; p_s é a carga de pressão média na superfície, e θ_0 é o teor volumétrico inicial do solo.

É notável a semelhança entre a forma dimensional das Equações (7) e Equação (44). Pode-se afirmar que, para uma escolha correta de parâmetros, o modelo de Green-Ampt pode ser deduzido a partir da equação de Richards. De fato, Barry *et al.* (1993) mostraram uma escolha de parâmetros específica a partir da qual o modelo de Green-Ampt foi deduzido.

Um ponto sobremaneira interessante de todo o processo acima descrito é que a hipótese de que há uma frente de molhagem bem definida na forma de pistão, utilizada nas deduções de Green-Ampt e Talsma-Parlange, não precisou, em nenhum momento, ser levada em consideração na solução.

7 Equação de infiltração de três parâmetros

Conforme demonstrado anteriormente, as equações de Green-Ampt e Talsma-Parlange têm consistência físico-matemática. Ambas são derivadas a partir de hipóteses físicas sólidas.

Ao observar o potencial dos modelos anteriormente descritos e o fato de que o comportamento real de solos tem como casos limites ambas as equações, Parlange *et al.* (1982) propuseram uma terceira relação, a qual interliga os dois modelos por meio de um parâmetro de interpolação α que varia de 0 a 1. Pode-se descrever a nova equação em termos das mesmas variáveis adimensionais como:

$$t_* = I_* + (1-\alpha)^{-1} \ln\left[\frac{\alpha}{1-(1-\alpha)\exp(-\alpha I_*)}\right] \tag{47}$$

Quando α tende a zero, a aplicação do limite e da regra de L´Hopital à Equação (47) fornece:

$$\begin{aligned} t_* &= I_* \lim_{\alpha\to 0}\left\{(1-\alpha)^{-1}\ln\left[\frac{\alpha}{1-(1-\alpha)\exp(-\alpha I_*)}\right]\right\} \\ &= I_* + \lim_{\alpha\to 0}\left\{\ln\left[\frac{1}{(I_*+1-I_*\alpha)\exp(-\alpha I_*)}\right]\right\} = I_* + \ln\left[\frac{1}{I_*+1}\right] \end{aligned} \tag{48}$$

Ou seja, o limite inferior é dado pela equação de Green-Ampt. Por outro lado, quando α tende a um, a partir da aplicação das técnicas de limite chega-se a:

$$\begin{aligned} t_* &= I_* + \lim_{x\to 1}\left\{\frac{-\ln\left[\dfrac{1-(1-\alpha)\exp(-\alpha I_*)}{\alpha}\right]}{(1-\alpha)}\right\} = \\ &= I_* + \lim_{x\to 1}\left\{\left[\frac{\alpha\left[\exp(-\alpha I_*) - I_*\exp(-\alpha I_*)(\alpha-1)\right] - \left[1+(\alpha-1)\exp(-\alpha I_*)\right]}{\alpha(1-(1-\alpha)\exp(-\alpha I_*))}\right]\right\} = \\ &= I_* + \exp(-I_*) - 1 \end{aligned} \tag{49}$$

Disso se pode dizer que o limite superior é dado pelo caso de Talsma-Parlange.

Não se pode resolver de maneira exata e analítica a Equação (47) em termos da função W de Lambert, o que torna necessária a busca por outra metodologia de solução. O método da inversão de Lagrange tem sido utilizado pelos autores no mais diversos campos da Engenharia Civil, como pode ser visto em Swamee *et al.* (2011a) e (2011b). A seguir, algumas definições básicas e a descrição do teorema são mostradas.

8 Função gama de Euler e o teorema da inversão de Lagrange

O teorema da inversão deduzido por Lagrange (1770) é uma poderosa ferramenta na solução de equações implícitas. Haja vista o grande número de situações em que equações desse tipo são encontradas na ciência, a importância do referido teorema tem sido verificada quase infalivelmente.

De maneira geral, o teorema tem por objetivo explicitar uma função y dada implicitamente por uma equação do tipo (WHITTAKER e WATSON, 1991):

$$y = \chi + \delta\varphi(y), \tag{50}$$

em que χ e δ são parâmetros e $\varphi(y)$ é uma função qualquer da variável de interesse y. Dessa maneira, qualquer função $\zeta(y)$ pode ser expressa como o seguinte somatório infinito:

$$\zeta(y) = \zeta(\chi) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta^n}{n!} \frac{d^{n-1}}{dx^{n-1}} \left\{ \frac{d\zeta(x)}{dx} \varphi^n(x) \right\} \Bigg|_{x=\chi} \tag{51}$$

É evidente que as condições de convergência da série na Equação (51) devem ser atendidas para que a solução proposta seja coerente. Nota-se, ainda, que na Equação (51) a série não depende de y. Assim, caso se considere $\zeta(y) = y$, a função antes descrita implicitamente na Equação (50) pode ser facilmente explicitada.

No processo de solução da Equação (47), utiliza-se outra função especial que provavelmente seja familiar ao leitor: a função Gama de Euler, também conhecida como função fatorial generalizada. Pode-se definir a função gama por meio da seguinte integral imprópria (ARTIN, 1964):

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \tag{52}$$

A integral acima é valida para qualquer argumento z complexo, exceto quando z = –t, t ϵ □. Nesse último caso, a função gama é indefinida. Por meio da utilização de técnicas de integração por partes, a partir da Equação (52), a seguinte importante propriedade pode ser demonstrada:

$$\Gamma(z + 1) = z\,\Gamma(z) \tag{53}$$

Quando z é um número natural, a Equação (53) pode ser reduzida a $\Gamma(z+1) = z!$, justificando-se, assim, a denominação de função fatorial generalizada. De posse das definições necessárias, procede-se para a obtenção da solução da Equação (47).

9 Teorema da inversão de Lagrange e a equação de três parâmetros

Considere-se a seguinte forma alternativa de apresentação da Equação (47)

$$T^{\alpha} - hT + a = 0, \tag{54}$$

em que $T = \exp(I_*)$, $h = \alpha \exp(t_*(\alpha-1))$ e $a = \alpha - 1$. Considere-se, ainda, a troca de variáveis $T^{-1} = i$. Assim, a Equação (54) se torna:

$$i^{\alpha-1} = \frac{ai^{\alpha}}{h} + \frac{1}{h} \tag{55}$$

Novamente, ao aplicar a troca de variáveis $s = i^{\alpha-1}$, obtém-se:

$$s = \frac{as^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}}{h} + \frac{1}{h} \tag{56}$$

Nota-se na Equação (56) que a variável de interesse s está implicitamente definida. A partir do teorema da inversão de Lagrange, tomando-se $\zeta(s) = s^{\frac{1}{1-\alpha}} = T$, a seguinte relação pode ser obtida:

$$T = (h)^{\frac{1}{\alpha-1}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[a/h]^n}{n!} \frac{d^{n-1}}{dx^{n-1}} \left\{ \frac{1}{1-\alpha} x^{\frac{1}{1-\alpha}-1} x^{\frac{\alpha}{\alpha-1}n} \right\}\Bigg|_{x=1/h} \tag{57}$$

Ao desfazer as trocas de variáveis, pode-se expressar explicitamente o valor da lâmina infiltrada acumulada adimensional, I_*, como:

$$I_* = t_* + \ln\left[\frac{1}{\alpha^{\frac{1}{1-\alpha}}(1-\alpha)} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(\alpha-1)}{\alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \exp[t_*\alpha]} \right)^n \frac{\Gamma\left(\frac{\alpha n}{\alpha-1} + \frac{1}{1-\alpha}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{\alpha-1} + \frac{2-\alpha}{1-\alpha}\right)} \frac{1}{n!} \right] \tag{58}$$

A partir da aplicação do teste da razão para convergência de séries, pode-se mostrar que a série da Equação (58) converge para $0 < \alpha < 1$, ou seja, nesse intervalo, a Equação (58) fornece a solução analítica exata para a Equação (47). De acordo com a precisão necessária, podem-se tomar tantos termos quanto se queiram na Equação (58). A título de verificação, sabe-se que, quando α=1/2, a Equação (47) tem solução em termos de funções elementares. Segundo Barry *et al.* (1993), o referido caso especial pode ser descrito por:

$$I_* = t_* + 2\ln\left[1 + \left(1 - \exp\left(-\frac{t_*}{2} \right) \right)^{1/2} \right] \tag{59}$$

Ao substituir α =1/2 na Equação (58), obtém-se, para a lâmina infiltrada acumulada adimensional:

$$I_* = t_* + \ln\left[8 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{-(1/2)^2}{\exp[t_*/2]} \right)^n \frac{\Gamma(-n+2)}{\Gamma(-2n+3)} \frac{1}{n!} \right] \tag{60}$$

Note-se que, de acordo com as singularidades da função Gama, a fórmula acima tem sentido apenas para os dois primeiros termos do somatório, haja vista que, para valores de *n* maiores, números inteiros negativos aparecem como argumentos. Esse tipo de consideração deve ser feito quando se pretende permutar entre o fatorial clássico e o fatorial generalizado, pois algumas das relações concernentes ao primeiro não são válidas para o segundo. Objetiva-se, então, aplicar alguma formulação que permita sair do domínio inteiro negativo e entrar no domínio dos positivos. Sabe-se, por outro lado, que o quociente de funções gamas na Equação (60) pode ser reescrito como:

$$\frac{\Gamma(-n+2)}{\Gamma(-2n+3)} = (-1)^{n-1}\frac{\Gamma(2n-2)}{\Gamma(n-1)} \tag{61}$$

Para a Equação (61), é possível notar que sua validade é verificada quando *n* é maior ou igual a dois. Dessa maneira, a Equação (60) pode ser reescrita como:

$$I_* = t_* + \ln\left[8\left\{\frac{1}{2} - \frac{\exp[-t_*/2]}{4} - \sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{\exp[-t_*/2]}{4}\right)^n \frac{\Gamma(2n-2)}{\Gamma(n-1)}\frac{1}{n!}\right\}\right] \tag{62}$$

Por outro lado, pela fórmula de duplicação da função gama, sabe-se que:

$$\Gamma(2(n-1)) = \frac{\Gamma(n-1)\Gamma\left(n-\frac{1}{2}\right)}{2^{3-2n}\sqrt{\pi}} \tag{63}$$

Pode-se demonstrar, a partir da aplicação sucessiva da Equação (53), que:

$$\Gamma\left(n-\frac{1}{2}\right) = -\frac{2(2n)!}{4^n n!(1-2n)}\sqrt{\pi} \tag{64}$$

Das Equações (63) e (64), tem-se:

$$\frac{\Gamma(2n-2)}{\Gamma(n-1)} = -\frac{(2n)!}{4(1-2n)n!} \tag{65}$$

Por outro lado, a combinação das Equações (62) e (65) fornece:

$$I_* = t_* + \ln\left[8\left\{\frac{1}{2} - \frac{\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]}{4} + \frac{1}{4}\sum_{n=2}^{\infty}\left(\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]\right)^n \frac{(2n)!}{4^n(1-2n)(n!)^2}\right\}\right] \tag{66}$$

Finalmente, a partir da soma e subtração dos dois primeiros termos da série, a expressão dentro do logaritmo no lado esquerdo da Equação (66) torna-se:

$$I_* = t_* + \ln\left[8\left\{\frac{1}{2} - \frac{\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]}{4} + \frac{1}{4}\left[\frac{\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]}{2} - 1 + \sum_{n=0}^{\infty}\left(\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]\right)^n \frac{(2n)!}{4^n(1-2n)(n!)^2}\right]\right\}\right] \tag{67}$$

$$I_* = t_* + \ln\left[8\left\{\frac{1}{4} - \frac{\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]}{8} + \frac{1}{4}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]\right)^n \frac{(2n)!}{4^n(1-2n)(n!)^2}\right\}\right]$$

É conhecida a seguinte relação para a expansão em série de Taylor para a função raiz quadrada:

$$\sqrt{1+x} = \sum_{n=0}^{\infty}(-x)^n \frac{(2n)!}{4^n(1-2n)}\frac{1}{(n!)^2} \tag{68}$$

Ao comparar as Equações (67) e (68), tem-se claramente:

$$I_* = t_* + \ln\left[2 - \exp\left[-\frac{t_*}{2}\right] + 2\sqrt{1-\exp\left[-\frac{t_*}{2}\right]}\right] \tag{69}$$

Em princípio as Equações (59) e (69) aparentam ser distintas; no entanto, note-se que:

$$\ln\left\{\left[1+\left(1-\exp\left(-\frac{t_*}{2}\right)\right)^{1/2}\right]^2\right\} = \ln\left\{2+2\left(1-\exp\left(-\frac{t_*}{2}\right)\right)^{1/2} - \exp\left(-\frac{t_*}{2}\right)\right\} \tag{70}$$

Por inspeção das Equações (59), (69) e (70), pode-se dizer que de fato a solução em forma de série infinita é correta, haja vista que se reduz a um caso de solução conhecida.

Cabe ressaltar também que, caso haja preferência por uma abordagem numérica, Ozelim *et al.* (2011) apresentaram a solução da Equação (47) por meio dos métodos de Householder, que se caracterizam por fornecer relações iterativas cuja convergência pode ser tomada tão rápida quanto se queira para uma única iteração.

10 Abordagem paramétrica da solução geral da equação de três parâmetros

Com o intuito de perceber a influência do parâmetro α no cálculo da lâmina de infiltração acumulada, utilizando a solução geral da equação de três parâmetros proposta na Equação (58), adotou-se uma abordagem paramétrica. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 2.

Note-se que uma avaliação superficial dos gráficos da Figura 2 implicaria em um pensamento de que o parâmetro de interpolação α tem papel diminuto no estabelecimento da relação entre a lâmina infiltrada e o tempo. Deve-se notar, no entanto, que a relação representada nesse gráfico fundamenta-se nas variáveis adimensionais, de forma que, quando a dimensioanalização é feita, as pequenas distâncias aferidas nos gráficos da Figura 2 passam a ter significativa importância. Dessa maneira, a utilização da equação de três parâmetros se torna completamente justificada.

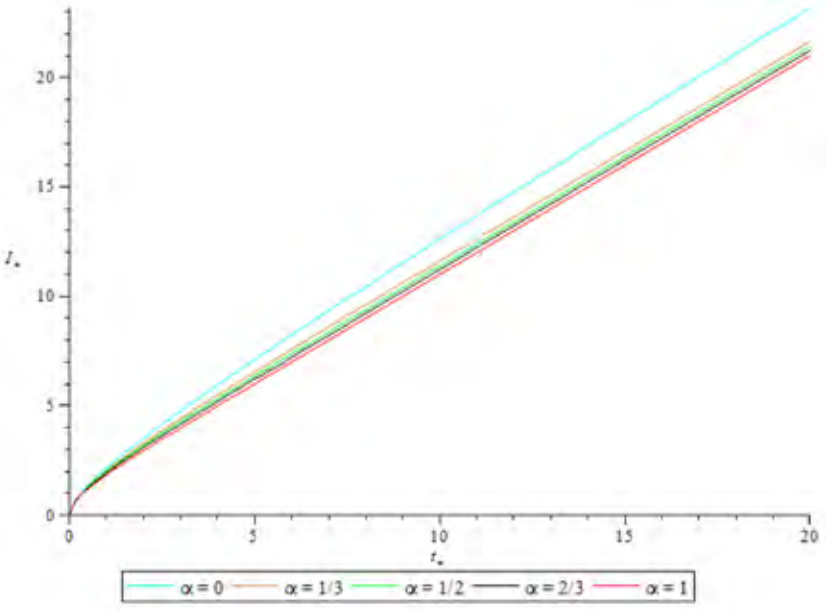


Figura 2. Abordagem Paramétrica da Solução Geral da Equação dos Três Parâmetros para Diferentes Valores de α.

11 Conclusão

O fenômeno de infiltração é um dos mais importantes componentes da ciência dos solos. Sabe-se que o desenvolvimento analítico com intuito de dedução de soluções exatas é muito importante na validação de qualquer modelo numérico. Além disso, quando se pode demonstrar de outra maneira a validade de modelos consagrados, não apenas a sua credibilidade, mas também sua aplicabilidade a situações mais gerais podem ser comprovadas.

A solução da equação implícita de Green-Ampt por meio da função W de Lambert representa uma boa alternativa de avaliação numérica da referida equação, haja vista o alto custo que o esforço computacional iterativo de tentativa e erro tem. O mesmo pode ser dito em relação à solução da equação de Talsma-Parlange pela mesma metodologia.

Por outro lado, a dedução de equações consagradas pela prática a partir de uma das mais estudadas equações diferenciais parciais da mecânica dos solos, a equação de Richards, reforça a confiabilidade de aplicação dos modelos.

Finalmente, a solução de maneira exata da equação que congrega todos os possíveis comportamentos de infiltração do solo representa um grande avanço na descrição desse importante fenômeno. Ainda, a apresentação do teorema da inversão de Lagrange como método eficaz na solução de equações implícitas instiga futuros pesquisadores a aplicá-lo na resolução dos mais diversos problemas.

Referências bibliográficas

ARTIN, E. (1964). The gamma function. Rinehart and Winston, New York: Holt.

BARRY, D. A.; PARLANGE, J-Y.; SANDER, G. C.; SIVAPLAN, M. (1993). A class of exact solutions for Richards' equation. Journal of Hydrology, n. 142, p. 29-46.

CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; ATAÍDE, W. F. (2007). Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil. Rev. Bras. Ciênc. Solo, v. 31, n. 5, p. 1141-1151.

CORLESS, R. M.; GONNET, G. H.; HARE, D. E. G.; JEFFREY, D. J.; KNNUTH, D. E. (1996). On the Lambert W function. Advances in Computational Mathematics 5, p. 329-359. doi: 10.1007/BF02124750.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. (1911). Studies in Soil physics. I. The flow of air and water through soils. J Agri. Sci., n. 4, v. 1, p.1-24.

LAGRANGE, J. L. (1770). Nouvelle méthode pour résoudre les équations littérales par le moyen des series. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin, v. 24, p. 251-326.

MEIN, R. G.; FARRELL, D. A. (1974). Determination of wetting front suction in the Green--Ampt equation. Soil Science Society of America Proceedings, v. 38, n. 6, p. 399-417.

OZELIM, L. C. S. M.; CAVALCANTE, A. L. B.; SWAMEE, P. K.; RATHIE, P. N. (2011). Métodos numéricos iterativos aplicados a equações de infiltração. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7, 2011, Pirenópolis, GO. Anais... Goiânia : Editora Kelps. v. 1, p. 209-213.

PARLANGE, J-Y.; BARRY, D. A.; HARVERKAMP, R. (2002). Explicit infiltration equations and the Lambert W-function. Advances in Water Resources, n. 25, p. 1119-1124.

PARLANGE, J-Y.; LISLE, I.; BRADDOCK, R. D.; SMITH, R. E. (1982). The three parameter infiltration equation. Soil Sci., n. 133, v. 6, p.337-41.

RAATS, P. A. C. (2001). Developments in soil–water physics since the mid 1960s. Geoderma, v. 100, p. 355-387.

RICHARDS, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, v. 5, p. 318-333.

SELKER, J. S.; KELLER, C. K.; McCORD J. T. (1999). Vadose zone processes. New York: Lewis Publishers. 339 p.

SWAMEE, P. K.; RATHIE, P. N.; OZELIM, L. C. S. M. (2011a). Application of analytical and numerical methods to the sequent depths problem in civil engineering. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, n. 5, v. 1, p. 38-47.

SWAMEE, P. K.; RATHIE, P. N.; OZELIM, L. C. S. M. (2011b). Analytical solutions for alternate depths. ISH Journal of Hydraulic Engineering, v. 17, p. 34-42.

TALSMA, T.; PARLANGE, J-Y. (1972). One-dimensional vertical infiltration. Australian J Soil Res., n. 10, p. 143-50.

WITTAKER, E. T.; WATSON, G. N. (1990). A course of modern analysis. 4th ed., Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. p. 133.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; MONTEBELLER, C. A. (2010). Adjustment of Green-Ampt-Mein-Larson model parameters under field conditions. Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient., v. 14, n.1 0, p. 1021-1029.

Capítulo 14
Modelagem do fluxo de água e ar em solos não saturados

Gilson de Farias Neves Gitirana Jr.
Eufrosina Terezinha Leão Carvalho
Breno Breseghelo do Nascimento
Manoel Porfírio Cordão Neto

1 Introdução

A análise de fluxo de água em solos não saturados é fundamental para o entendimento de mecanismos de infiltração, para o desempenho de estruturas de infiltração e para o projeto de tais sistemas. O processo de infiltração pode ser compreendido e modelado utilizando os conceitos de mecânica do contínuo e as propriedades de solos não saturados que estabelecem suas características de armazenamento e de percolação de água. Além do fluxo de água, outro mecanismo de fluxo relevante é o fluxo de ar. O ar e a água do solo possuem características tanto de imiscibilidade quanto de miscibilidade. A água pode ser encontrada no ar do poro do solo na forma de vapor. Ao mesmo tempo, a grande parcela da água, que ocupa os vazios do solo, compete por espaço com o ar livre. As pressões relativas de ambas as fases acabam por interferir no fluxo e no volume armazenado.

Este capítulo apresenta a abordagem teórica para a análise dos mecanismos de fluxo citados. Serão apresentadas as equações fundamentais no sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas, uma vez que diferentes estruturas de infiltração podem se beneficiar de ambos os sistemas. Os principais mecanismos de fluxo serão considerados. Em seguida, será apresentada uma breve descrição das propriedades de fluxo e armazenamento do solo e das formas de representação geralmente adotadas. Finalmente, será apresentada uma discussão a respeito da interação entre o fluxo de ar e água no solo.

2 Formulação do fluxo de água e ar

A modelagem do fluxo em solos não saturados se baseia em hipóteses fundamentais adotadas no desenvolvimento teórico, no estabelecimento de variáveis de estado adequadas e na adoção de leis fundamentais de conservação de massa. As formulações aqui apresentadas são baseadas na descrição das fases do solo utilizando a mecânica do contínuo. Várias outras hipóteses simplificadoras serão adotadas e apresentadas no decorrer do capítulo.

Uma hipótese simplificadora frequentemente adotada corresponde à consideração da fase ar como estando em permanente contato com a atmosfera, ou seja, os gradientes de pressão de ar são considerados desprezíveis. Tal hipótese, entretanto, não é considerada aqui, uma vez que a interação entre o fluxo de ar e água pode ter papel importante nos processos de infiltração.

2.1 Conservação de massa e calor

As equações diferenciais que regem a conservação de massa de água e de ar são desenvolvidas considerando um elemento de solo infinitesimal representativo (Figura 1). As equações de conservação são obtidas considerando a diferença entre as taxas de fluxo que entram e saem do elemento de solo e igualando esta diferença à taxa de mudança de quantidade de massa armazenada no elemento de solo. As equações a seguir são obtidas considerando coordenadas cartesianas e cilíndricas, respectivamente:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}-\frac{\partial q_y}{\partial y}-\frac{\partial q_z}{\partial z}=\frac{1}{V_0}\frac{\partial M}{\partial t} \tag{1}$$

$$-\frac{1}{r}\frac{\partial (rq_r)}{\partial r}-\frac{1}{r}\frac{\partial q_\theta}{\partial \theta}-\frac{\partial q_y}{\partial y}=\frac{1}{V_0}\frac{\partial M}{\partial t} \tag{2}$$

em que:

q_i = ρv_i; taxa de fluxo total de massa (água ou ar) na direção *i*, através de uma seção unitária de solo, [M/L²t];

ρ = massa específica, [M/L³];

v_i = taxa de fluxo de volume (água ou ar) na direção *i*, através de uma seção unitária de solo, [M/t];

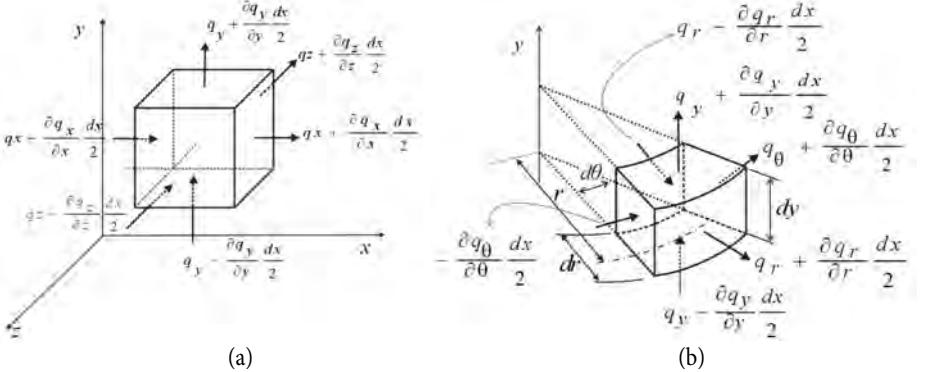
V_0 = volume de referência, $V_0 = dxdydz$, [L³];

M = Massa (água ou ar) armazenada no elemento de solo infinitesimal, [M];

t = tempo.

2.2 Armazenagem de água e ar no solo

A relação constitutiva para a quantidade de água armazenada nos poros do solo é normalmente dada em termos volumétricos, desprezando a compressibilidade da água. As mudanças no volume de água armazenado podem ser escritas em função das variáveis de estado de tensão do solo e da variação de volume total, da seguinte forma:



(a) (b)

Figura 1. Elemento de solo infinitesimal representativo e componentes de fluxo, *q*, nas faces do elemento: a) coordenadas cartesianas e b) coordenadas cilíndricas.

$$\frac{dV_w}{V_0} = m_1^w d(\sigma_{méd} - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w) \quad (3)$$

$$\frac{dV_v}{V_0} = m_1^s d(\sigma_{méd} - u_a) + m_2^s d(u_a - u_w) \quad (4)$$

$$\frac{dV_w}{V_0} = \beta_1^w \frac{dV_v}{V_0} + \beta_2^w d(u_a - u_w) \quad (5)$$

em que:

V_w = volume de água armazenada;

V_v = volume de vazios;

$m_1^w = \frac{S}{1+e_0}\frac{de}{d(\sigma_{méd} - u_a)} + \frac{e}{1+e_0}\frac{dS}{d(\sigma_{méd} - u_a)}$;

$m_2^w = \frac{S}{1+e_0}\frac{de}{d(u_a - u_w)} + \frac{e}{1+e_0}\frac{dS}{d(u_a - u_w)}$;

$m_1^s = \frac{1}{1+e_0}\frac{de}{d(\sigma_{méd} - u_a)}$;

$m_2^s = \frac{1}{1+e_0}\frac{de}{d(u_a - u_w)}$;

S = grau de saturação;

e = índice de vazios;

$(\sigma_{mean} - u_a)$ = tensão líquida média, [F/M²];

$(u_a - u_w)$ = sucção matricial, [F/M²];

σ_{mean} = Tensão total média, [F/M²];

u_a = poropressão de ar, [F/M²];

u_w = poropressão de água, [F/M²];

$\beta_1^w = m_1^w / m_1^s$;

$\beta_2^w = m_2^w - m_1^w m_2^s / m_1^s$.

As equações (3) a (5) são baseadas na hipótese de que as mudanças no volume de água armazenada dependem das mudanças no estado de tensão, definido por duas variáveis de tensão independentes. A utilização de superfícies de estado (i.e., funções tridimensionais dependentes de $\sigma_{méd} - u_a$ e $u_a - u_w$) para o índice de vazios e grau de saturação oferece um método eficiente para a obtenção dos coeficientes das equações. A superfície de estado de armazenagem de água, quando representada apenas como função da sucção matricial, é conhecida como curva característica.

As equações apresentadas permitem uma transição contínua entre a condição saturada e a não saturada. À medida que o solo se torna saturado, os efeitos das variações de sucção matricial e das variações da tensão líquida média se tornam iguais (i.e., $m_1^s = m_2^s = m_1^w = m_2^w$). Consequentemente, para condições saturadas, as variações de volume de água armazenado são iguais às variações de volume total.

A determinação da quantidade de ar armazenado no solo requer a determinação de duas das variáveis a seguir: V_a, M_a, e ρ_a. A massa específica e o volume de ar armazenados no solo são dados pelas seguintes equações:

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_a} = \frac{W_a}{RT}\bar{u}_a \tag{6}$$

$$\frac{dV_a}{V_0} = \beta_1^a d\varepsilon_v + \beta_2^a d(u_a - u_w) \tag{7}$$

em que:

ρ_a = densidade do ar, [M/L^3];

W_a = peso molecular do ar, 28.966 [M/mol];

$\bar{u}_a$ = pressão total da fase ar, $u_a + u_{atm}$, [F/M^2];

u_a = pressão de ar, [F/M^2];

u_{atm} = pressão atmosférica, [F/M^2];

β_1^a = $1 - \beta_1^w (1 - H_c)$;

β_2^a = $- \beta_2^w (1 - H_c)$;

H_c = coeficiente de solubilidade volumétrica de Henry, V_{ad}/V_w;

V_{ad} = volume de ar dissolvido na água.

A Equação (7) mostra como as características de mudança de volume da fase ar podem ser diretamente obtidas a partir das características de variação de volume da fase água e da medida de variação de volume do esqueleto sólido.

2.3 Leis de fluxo

As leis de fluxo estabelecem relações entre medidas de taxa de fluxo e gradientes de potenciais no espaço. Os potenciais podem ser estabelecidos com base na análise da energia armazenada na fase (BEAR, 1972). Conforme apresenta Gitirana Jr.*et al.* (2006), a água e o ar do solo apresentam fases com características tanto miscíveis quanto imiscíveis. A fase ar pode fluir na forma de ar livre, na forma de ar dissolvido através da água, ou na forma de ar dissolvido carreado pela água em movimento. A fase água pode fluir na forma de água líquida, na forma de vapor de água em difusão através dos poros preenchidos de ar, ou na forma de vapor de água carreado pela fase ar em movimento. As sessões a seguir apresentarão uma descrição concisa das leis de fluxo.

A taxa de fluxo de água líquida em solos não saturados pode ser descrita utilizando uma generalização da lei de Darcy, em que o potencial é o gradiente de carga hidráulica e a condutividade hidráulica varia com a sucção matricial, $(u_a - u_w)$. A lei de Darcy generalizada pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_y^w = -k^w \frac{\partial h}{\partial y} \tag{8}$$

em que:

v_y^{wl} = taxa de fluxo de volume água líquida na direção y através de uma secção de solo unitária, [L^3/L^2t];

k^w = condutividade hidráulica, $k^w = f(u_a - u_w)$, [L/t];

h = $u_w / \gamma_w + y$, carga hidráulica, [L];

γ_w = peso específico da água, [F/M^3];

y = elevação, [L].

A Equação (8) pode ser generalizada para qualquer outra direção no espaço, utilizando também o sistema de coordenadas cilíndricas. No caso de materiais anisotrópicos, os fluxos podem ser representados pelos gradientes nas várias direções e pelas condutividades correspondentes, conforme apresentado por Freeze & Cherry (1979).

O fluxo de água no solo pode também ser visto como a soma de vários componentes, correspondentes ao fluxo de água líquida e vapor de água. Os vários mecanismos de fluxo são descritos em detalhe por Gitirana Jr. *et al.* (2006). A equação a seguir descreve a soma de três possíveis mecanismos de fluxo:

$$v_y^w = v_y^{wl} + v_y^{vd} + v_y^{va} = -k^w \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{k^{vd}}{\gamma_w}\left(\frac{\partial u_w}{\partial y} + \frac{-u_w}{T}\frac{\partial T}{\partial y}\right) - \frac{k^{va}}{\gamma_a}\frac{\partial u_a}{\partial y} \quad (9)$$

em que:

v_y^w = taxa de fluxo total de água na direção y através de uma secção de solo unitária, [L^3/L^2t];

v_y^{vd} = taxa de fluxo de vapor de água na direção y através de uma secção de solo unitária, devido a gradientes de concentração de vapor, [L^3/L^2t];

v_y^{va} = taxa de fluxo de vapor de água na direção y através de uma secção unitária de solo, devido ao fluxo de ar, [L^3/L^2t];

k^{vd} = Condutividade do solo ao vapor de água correspondente à difusão de vapor através da fase ar, [L/t];

k^{va} = condutividade do solo ao vapor de água correspondente ao carreamento de vapor pela fase ar em movimento, [L/t];

γ_a = peso específico do ar, [F/M^3].

A função de condutividade hidráulica (i.e., a função que representa os valores de k^w em função da sucção matricial) pode ser obtida experimentalmente utilizando ensaios de laboratório e campo. A função pode ser obtida também por meio de técnicas aproximadas de estimativa, utilizando o valor da condutividade hidráulica na condição saturada e utilizando a curva característica (FREDLUND *et al.*, 1994). A utilização de uma função de permeabilidade constante permite uma transição contínua entre a condição saturada e a condição não saturada.

Conforme explica Gitirana Jr.*et al.* (2006), o fluxo de ar seco ocorre por meio de dois mecanismos principais. O ar pode fluir na forma de ar livre, devido a gradientes de concentração de ar. Além disso, o ar pode fluir através da água líquida do solo, na forma de ar dissolvido. O ar dissolvido pode se mover devido ao movimento da própria água (i.e., advecção) ou ao fluxo por advecção, que pode ocorrer mesmo quando a água esteja em repouso e deve-sea

gradientes de concentração de ar. Gitirana Jr. *et al.* (2006) apresentam as seguintes equações para os vários mecanismos de fluxo de ar no solo:

$$v_y^a = v_y^{af} + v_y^{ad} + v_y^{aa} = -\frac{k^a}{\gamma_a}\frac{\partial u_a}{\partial y} - \frac{k^{ad}}{\gamma_a}\frac{\partial u_a}{\partial y} - H_c k^w \frac{\partial h}{\partial y} \tag{10}$$

em que:

v_y^a = taxa de fluxo total de ar na direção *y* através de uma secção unitária de solo, [L^3/L^2t];

v_y^{af} = taxa de fluxo de ar na direção *y* através de uma secção unitária de solo, devido à gradientes de concentração de ar, [L^3/L^2t];

v_y^{ad} = taxa de fluxo de ar dissolvido na direção *y* através de uma secção unitária de solo devido a gradientes de concentração de ar, [L^3/L^2t];

v_y^{aa} = taxa de fluxo de ar dissolvido na água na direção *y* através de uma secção unitária de solo, devido ao fluxo de água líquida, [L^3/L^2t];

k^a = condutividade ao fluxo de ar livre, [L/t];

k^{ad} = condutividade ao fluxo de ar correspondente à difusão através da fase líquida, [L/t].

2.4 Equações diferenciais parciais que governam o fluxo de água e ar

As equações diferenciais parciais que governam a conservação e o fluxo de água e ar são obtidas combinando as equações de conservação de massa de água e ar, Equações (1) e (2), as relações constitutivas que permitem o cálculo da massa de água e ar armazenados no solo, Equações (3) a (7), e as leis de fluxo dadas pelas Equações (9) e (10). Dessa forma, o seguinte par de equações é obtido:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[k^w \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_w}{\gamma_w} + y\right) + \frac{k^{vd}}{\gamma_w}\frac{\partial u_w}{\partial y} + \frac{k^{vd}}{\gamma_w}\frac{-u_w}{T}\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{k^{va}}{\gamma_a}\frac{\partial u_a}{\partial y}\right] = \beta_1^w \frac{d\varepsilon_v}{dt} + \beta_2^w \frac{d(u_a - u_w)}{dt} \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{k^a}{g}\frac{\partial u_a}{\partial y} + \frac{k^{ad}}{g}\frac{\partial u_a}{\partial y} + \rho_a H_c k^w \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_w}{\gamma_w} + y\right)\right] = \frac{W_a}{RT}\bar{u}_a \beta_1^a \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{W_a}{RT}\bar{u}_a \beta_2^a \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} + (1 - S + H_c S)n\frac{W_a}{RT}\frac{\partial u_a}{\partial t} \tag{12}$$

As equações apresentadas foram simplificadas para o caso unidimensional, com fluxo apenas na direção vertical, *y*. A alteração dessas equações para condições geométricas mais gerais é trivial. As Equações (11) e (12) formam um sistema indeterminado, composto por quatro variáveis principais:ε_v, u_w, u_a, e *T*. Para obter-se um sistema determinado, essas equações precisam ser simplificadas. Pode-se também considerar equações adicionais que resultariam em um sistema determinado, quais sejam: as equações de equilíbrio/tensão-deformação e a equação diferencial para fluxo de calor.

Pode-se simplificar o sistema de equações, considerando as seguintes hipóteses frequentemente adotadas:

- os fluxos de vapor de água carregada por fluxo de ar e o fluxo de ar dissolvido na água são desprezíveis;
- o problema é isotérmico;
- as variações de volume total do solo durante o processo de fluxo possuem pequeno impacto no processo de fluxo em si, podendo ser desprezados.

Considerando essas simplificações, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[k^{w}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_w}{\gamma_w}+y\right)+\frac{k^{vd}}{\gamma_w}\frac{\partial u_w}{\partial y}\right]=m_2^{w}\frac{d(u_a-u_w)}{dt} \tag{13}$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{k^{a}}{g}\frac{\partial u_a}{\partial y}\right]=-\frac{W_a}{RT}\overline{u}_a m_2^{w}(1-H_c)\frac{\partial(u_a-u_w)}{\partial t}+(1-S+H_cS)n\frac{W_a}{RT}\frac{\partial u_a}{\partial t} \tag{14}$$

Três propriedades não lineares podem ser identificadas na Equação (13): a condutividade hidráulica, a condutividade ao fluxo de vapor e a derivada da curva característica. Duas propriedades podem ser identificadas na Equação (14): a condutividade ao fluxo de ar e o coeficiente de variação de volume de ar armazenado, dado pelo complemento da curva característica. Essas propriedades variam com a sucção e, portanto, a equação diferencial é fisicamente não linear.

As Equações (11) a (14) produzem uma transição contínua entre a condição saturada e a condição não saturada. À medida que a sucção matricial se reduz e se aproxima de zero, β_1^{w} se torna igual a 1 e β_2^{w}se torna igual a zero. Em outras palavras, conforme o solo satura, as variações de quantidade de água armazenada passam a ser função apenas das mudanças de volume total. À medida que a sucção reduz e se aproxima de zero, β_1^{a} se torna igual a H_c e β_2^{a} se torna igual azero. Ou seja, à medida que o solo se torna saturado, as variações de ar armazenado se tornam uma função exclusiva das variações de volume total, dado pela quantidade de ar dissolvido na água (GITIRANA JR. *et al*., 2006).

2.5 Condições iniciais e de fronteiras típicas em problemas de infiltração

Vários tipos de condições de fronteira podem ser aplicados às equações diferenciais parciais de fluxo. A integração por partes das derivadas de segunda ordem resulta em uma integral de superfície que corresponde à condição de fronteira *natural* (ou de *Neumann*). A condição de fronteira *Natural* associada com as Equações (11) a (14) correspondem ao fluxo total de água e ar, normais à fronteira do domínio. É importante compreender que a condição de fronteira natural associada não faz distinção entre os tipos de fluxo (seja o fluxo de água líquida, de vapor de água, etc.). Outro tipo de condição de fronteira que pode ser aplicado às Equações (11) a (14) corresponde a valores pré-determinados (impostos) de poropressão de água (condição de fronteira *Essencial* ou de *Dirichlet*).

A Figura 2 apresenta condições iniciais e de fronteira em uma análise de poços de infiltração realizada por Carvalho (2008). As condições iniciais e poropressão de água podem ser especificadas a partir do conhecimento da posição do lençol freático, considerando uma distribuição hidrostática. Uma representação das condições iniciais de poropressão de água mais elaborada seria possível a partir de medições em campo. Analogamente, uma condição inicial

simplificada para as poropressões de ar pode ser obtida considerando que tais poropressões são equivalentes à pressão atmosférica (i.e., são iguais a zero).

Condições de fronteira típicas são também apresentadas na Figura 2. No caso da simulação de um poço de infiltração, condições do tipo *Natural* são aplicadas na fronteira inferior e na fronteira à esquerda, onde foi considerado que a quantidade de fluxo é especificada, sendo neste caso igual a zero. Condições de fronteira do tipo *Essencial* são necessárias para simular a presença de uma lâmina d'água no interior do poço, conforme pode ser visto na fronteira esquerda do domínio.

Condições de fronteira mais sofisticadas são necessárias para a reprodução do comportamento na interface solo-atmosfera. As formulações matemáticas dos fluxos entre o solo e a atmosfera, tais como a infiltração, o escoamento superficial e a evaporação, são baseadas em modificações das condições de fronteira *natural* e *essencial*. Esses tipos especiais de condições de fronteira são abordados em detalhe por Gitirana Jr. (2005).

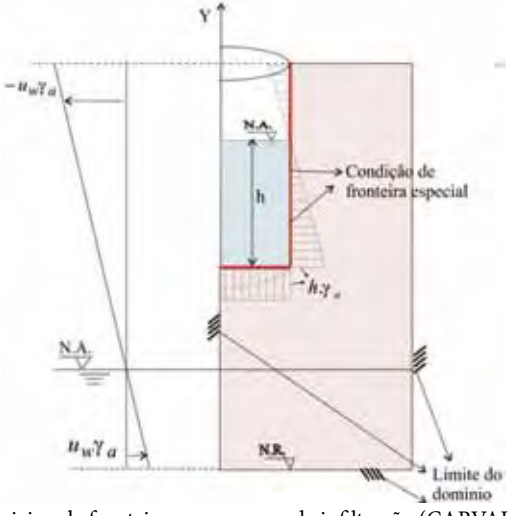


Figura 2. Condições iniciais e de fronteira em um poço de infiltração (CARVALHO, 2008).

2.6 Comentários sobre a interação entre o fluxo de ar e água

O fluxo de água e ar são dois fenômenos fortemente acoplados. Mudanças tanto nas poropressões de água quanto nas poropressões de ar causam alterações na quantidade de água armazenada no solo. Dessa forma, fluxos de água podem ser originados a partir de alterações nos dois tipos de poropressões. Uma vez que a quantidade de água armazenada no solo é alterada, tanto a condutividade hidráulica quanto a condutividade ao fluxo de ar começam a ser alteradas. A condutividade hidráulica diminui à medida que o grau de saturação do solo diminui. Por outro lado, a condutividade ao fluxo de ar aumenta à medida que o grau de saturação diminui. Mudança no grau de saturação induzidos pelas condições de fluxo de água podem resultar em alterações nas poropressões de ar, e vice-versa.O acoplamento entre o fluxo de água e ar no solo é obtido exprimindo a curva característica solo-água em termos de sucção matricial

3 Modelagem das propriedades do solo

O valor da sucção em um solo (e consequentemente da carga hidráulica) está diretamente relacionado com a quantidade de água presente nos seus vazios. Quanto menor o volume de água presente, maior será o valor da sucção, e vice-versa. A partir de valores de sucção com os seus correspondentes valores de saturação ou umidade volumétrica da massa de solo, plota-se uma curva chamada curva característica solo-água (CCSA). Esta é uma relação constitutiva importante para descrever o fluxo em solos não saturados e é definida como a relação entre o conteúdo de água e a sucção no solo (WILLIAMS, 1982 *apud* FREDLUND e XING, 1994). O conteúdo de água pode ser expresso em termos de umidade volumétrica (θ), umidade gravimétrica (w) ou saturação (S), e a sucção em termos de sucção matricial (u_a-u_w) ou sucção total (ψ). Para valores altos de sucção, a sucção matricial e a total podem, geralmente, ser assumidas como equivalentes (FREDLUND e XING, 1994).

A Figura 3 apresenta um exemplo de curva característica para um solo unimodal, em que são indicados parâmetros importantes que definem a curva: valor de entrada de ar e conteúdo residual de água. A curva é representada na escala logarítmica no eixo das abscissas, devido ao valor de sucção variar exponencialmente com o conteúdo de água, o que demanda uma escala logarítmica para representar toda a gama de valores.

O valor de entrada de ar é o valor de sucção para o qual, durante o processo de secagem, o ar começa a entrar nos maiores poros do solo, sendo assim uma medida do tamanho desses poros (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). A umidade residual é o conteúdo de água a partir do qual uma grande mudança na sucção é necessária para remover mais água do solo. Pelo fato de ambas as definições serem subjetivas, a determinação rigorosa dos dois valores é feita a partir do cruzamento de linhas tangentes aos pontos de inflexão da curva (FREDLUND e XING, 1994), como pode ser visto na Figura 3. Para solos bimodais, ou seja, solos com uma distribuição granulométrica que apresenta um patamar intermediário, têm-se dois valores de entrada de ar e dois valores de umidade residual (GITIRANA JR. e FREDLUND, 2004).

O valor da sucção para conteúdo de água igual a zero corresponde a cerca de 10^6 kPa, observado experimentalmente e deduzido a partir de considerações termodinâmicas (RICHARDS, 1965 *apud* FREDLUND e XING, 1994). Isso significa que, em qualquer meio poroso, existe um valor máximo de sucção, que corresponde à umidade relativa nula.

A curva característica exibe histerese entre as curvas de molhagem e secagem do solo, como pode ser visto nas duas curvas da Figura 3. Isso se deve ao aprisionamento do ar no

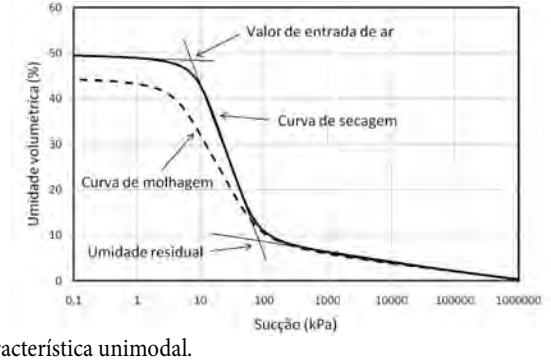


Figura 3. Curva característica unimodal.

solo durante a molhagem (FREDLUND e XING, 1994), apesar de manter sua forma sigmoide nos dois casos. Gitirana Jr. (2005) propõe a utilização de uma CCSA média em problemas de evaporação e precipitação em uma superfície de solo.

3.1 Equações de ajuste para a curva característica solo-água

A curva característica pode ser representada através de diversos tipos de equações de ajuste. Essas equações são ajustadas a dados obtidos experimentalmente, obtendo-se uma representação matemática da CCSA que pode ser usada em análises numéricas e na previsão de diversas propriedades de solos não saturados. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais equações propostas na literatura para se representar a CCSA.

Para se determinarem os melhores parâmetros de ajuste para cada equação, são utilizadas técnicas de regressão não-linear. As mais simples são aquelas baseadas no método dos mínimos quadrados. A curva é ajustada de forma que ela passe o mais próximo possível dos pontos experimentais, sem necessariamente cruzar qualquer um deles (SILLERS e FREDLUND, 2001).

A maioria das equações anteriores à de Fredlund e Xing (1994) eram empíricas por natureza. Esses autores propuseram uma nova equação de ajuste, baseada na distribuição do tamanho dos poros no solo. Tendo-se essa distribuição, é possível determinar a curva característica. O fator de correção C(ψ) presente na equação foi proposto para que a o modelo resultasse na sucção máxima (10^6 kPa) quando o conteúdo de água fosse zero. Essa equação apresenta bons ajustes para curva característica para toda a gama de valores de sucção.

Tabela 1. Equações da curva característica.

Autor	Equação		Parâmetros
Gardner (1956)	$\Theta_d = 1/(1 + a_g \psi^{ng})$		2: a_g e n_g
Brooks e Corey (1964)	$\Theta_d = 1$ $\Theta_d = 1\ (\psi/a_c)^{-n_c}$	$\psi < \psi_b$ $\psi \geq \psi_b$	3: a_c, n_c e ψ_b
Brutsaert (1966)	$\Theta_d = 1/(1 + (\psi/a_r)^{n_r}$		2: a_r e n_r
Van Genuchten (1980)	$\Theta_d = 1/(1 + a_s \psi^{n_s})^{ms}$		3: a_u, n_u e m_u
Van Genuchten (1980) – Burdine (1953)	$\Theta_d = 1/(1 + (a_b \psi)^{n_b})^{(1-2/n_b)}$		2: a_b e n_b
Van Genuchten (1980) – Mualem (1953)	$\Theta_d = 1/(1 + (a_m \psi)^{nm})^{(1-1/n_m)}$		2: a_m e n_m
McKee eBumb (1984)	$\Theta_d = 1$ $\Theta_d = exp\ ((a_z - \psi)/n_z$	$\psi < \psi_b$ $\psi \geq \psi_b$	3: a_z, n_z e ψ_b
McKee eBumb (1987)	$\Theta_d = 1/(1 + exp\ ((\psi - a_e)/n_e)$		2: a_s e n_s

(continuação)

Autor	Equação	Parâmetros
Fredlund eXing (1994) – corrigida	$\Theta_d = C(\psi) \cdot (1 / \ln (e + (\psi/a_f)^{n_f}))^{m_f}$ $C(\psi) = \frac{-ln\,(1 + \psi/\psi_{res})}{ln\,(1 + (10^6/\psi_{res}))} + 1$	4: a_f, n_f, m_f e ψ_{res}
Gitirana Jr. E Fredlund (2004) – unimodal com 2 pontos de inflexão	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_b\,\psi_{res}})^d} + S_2$	4: ψ_b, ψ_{res}, S_{res} e a

Notas: Definição das variáveis: θ: umidade volumétrica; θ_s: umidade volumétrica saturada; θ_f: umidade volumétrica residual; Θ_d: umidade volumétrica adimensional, (θ / θ_s); Ψ: sucção; Ψ_b: valor de entrada de ar; Ψ_{res}: sucção residual; S_{res}: saturação residual; a, n, e m: parâmetros de ajuste; S1 e S2: parâmetros da curva (ver Gitirana Jr.eFredlund, 2004).

A equação de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) se diferencia das outras na medida em que seus parâmetros são propriedades bem definidas dos solos não saturados, facilitando o tratamento estatístico de CCSAs. O modelo desenvolvido foi baseado na equação da hipérbole representada no sistema de coordenadas log(sucção)-S. Os parâmetros de ajuste escolhidos foram o valor de entrada de ar, a sucção residual, a saturação residual e um parâmetro que controla a suavidade da curva. Além da curva unimodal com dois pontos de inflexão, esses autores também desenvolveram curvas unimodais com um ponto de inflexão e bimodal.

Um dos usos da equação da curva característica é na modelagem numérica de fluxo de água em solos não saturados. É conveniente que a equação de ajuste atenda a certos aspectos de consistência, para que se evitem problemas de ordem numérica. Os impactos negativos da utilização de equações inapropriadas são, principalmente, a necessidade de passos de tempo menores e maior refinamento da malha para que o erro fique dentro dos limites especificados.

A Tabela 2 apresenta quatro aspectos de consistência das equações da Tabela 2.1, verificados por Nascimento (2011):

- a continuidade da derivada de primeira ordem da função;
- o limite superior da curva, em que o grau de saturação deve ser igual a 1 para a sucção nula;
- a derivada da curva, que deve ser nula para sucção igual a zero;
- o limite inferior da curva, em que o grau de saturação deve ser zero para sucção igual a 10^6.

Tabela 2. Aspectos de consistência verificados nas equações de ajuste.

	Continuidade de $\frac{dS}{d\psi}$	$S = 1$ para $\psi = 0$	$\frac{dS}{d\psi}_{\psi = 0} = 0$ para	$S = 0$ para $\psi = 10^6$
Gardner (1956)	S	S	S	N
Brooks e Corey (1964)	N	S	S	N
Brutsaert (1966)	S	S	S	N

(continuação)

	Continuidade de $\frac{dS}{d\psi}$	$S = 1$ para $\psi = 0$	$\frac{dS}{d\psi} = 0$ para $\psi = 0$	$S = 0$ para $\psi = 10^6$
Van Genuchten (1980)	S	S	S	N
Van Genuchten (1980) – Burdine (1953)	S	S	S	N
Van Genuchten (1980) – Mualem (1953)	S	S	S	N
Mckee e Bumb (1984)	N	S	S	N
Mckee e Bumb (1987)	S	N	N	NE
Fredlund e Xing (1994)	S	S	S	S
Gitirana Jr. e Fredlund (2004)	S	N	S	S

Legenda: S: sim; N: não; NE: não existe.

É desejável que uma equação de ajuste tenha derivada de primeira ordem contínua em toda a gama de valores de sucção. Observa-se que as equações de Brooks e Corey (1964) e Mckee e Bumb (1984) apresentam uma mudança descontínua de declividade para o valor de entrada de ar, o que produz um ponto de singularidade que traz dificuldades para a modelagem numérica de fluxo. Van Genuchten (1980) afirma que a descontinuidade presente na equação de Brooks e Corey (1964), algumas vezes, impede a convergência rápida em modelos numéricos de fluxo saturado-não saturado.

Observa-se que a maioria das equações, exceto a de Fredlund e Xing (1994) e Gitirana Jr. e Fredlund (2004), não apresenta valor de saturação nulo para a sucção igual a 10^6. Esse fato pode gerar erros na modelagem de problemas com valores altos de sucção. Um exemplo são problemas de fluxo solo-atmosfera, em que, na região do contorno onde se aplica a condição de fluxo, os valores de sucção são altos, devido à baixa umidade.

3.2 Equações para a função de condutividade hidráulica

De acordo com Mitchell e Soga (2005), a condutividade hidráulica é a propriedade do solo de maior variabilidade. Esta variabilidade é observada entre diferentes tipos de solo e também para diferentes pontos de um mesmo depósito, diminuindo o valor de k^w com a diminuição do tamanho das partículas. A Figura 4 apresenta um exemplo de função de condutividade hidráulica do solo, expressa em termos de permeabilidade relativa.

A condutividade hidráulica permanece constante quando o solo está totalmente saturado, diminuindo à medida que ocorre a desaturação. Isso se deve a dois fatores principais. O primeiro é o fato de que a água só é capaz de fluir em regiões onde ela está presente. À medida que o solo perde umidade, ocorrem descontinuidades na fase água, surgindo pontos de au-

sência de líquido, diminuindo a permeabilidade. O segundo fator, relacionado ao primeiro, é o aumento da tortuosidade do caminho de percolação com as descontinuidades, fazendo com que as moléculas atravessem caminhos mais irregulares ao longo do esqueleto sólido, reduzindo a permeabilidade.

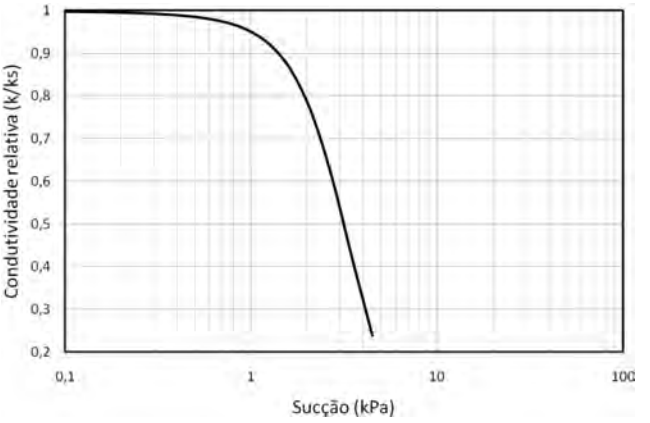


Figura 4. Função de condutividade hidráulica.

A Tabela 3 apresenta um apanhado geral dos principais modelos para descrição da função de condutividade hidráulica. Uma função que descreva a condutividade hidráulica deve ser obtida para ser utilizada na solução das equações diferenciais de fluxo. Vários métodos existem para a determinação da função de permeabilidade do solo. Fredlund *et al.* (1994) dividem os modelos de obtenção da função em modelos empíricos e modelos estatísticos. Os modelos empíricos são modelos de ajuste de uma função empírica a dados experimentais. Eles podem ser usados na prática desde que se tenham dados experimentais da permeabilidade do solo. O número mínimo de pontos medidos necessários para o ajuste é igual ao número de parâmetros de ajuste da equação considerada (FREDLUND, XING e HUANG, 1994).

Tabela 3. Modelos para a descrição da função de condutividade hidráulica.

Modelos empíricos baseados na umidade volumétrica, $k^w(\theta)$	
Averjanov (1950)	$k^w = k^w_{sat}\ \Theta^{3,5}$, onde $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$
Davidson *et al* (1969)	$k^w = k^w_{sat}\ exp\ [\alpha\ (\theta - \theta_s)]$
Campbell (1973)	$k^w = k^w_{sat}\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\alpha}$
Modelos empíricos baseados na sucção, $k^w(\psi)$	
Richards (1931)	$k^w = a\psi + b$
Wind (1955)	$k^w = a\psi^{-n}$
Gardner (1958)	$k_{res} = exp\ (-a\psi)$ $k^w = k^w_{sat}/(a\psi^n + 1)$

(continuação)

Brooks e Corey (1964)	$k^w = k^w_{sat}$ para $\psi < \psi_b$ $k^w = k^w_{sat}(\psi_b/\psi)^n$ para $\psi \geq \psi_b$
Rijtema (1965)	$k^w = k^w_{sat}$ para $\psi \leq \psi_b$ $k^w = k^w_{sat}\ exp[-\alpha\,(\psi - \psi_b)]$ para $\psi_b \leq \psi \leq \psi_{res}$ $k^w = k_{res}\left(\frac{\psi}{\psi_{res}}\right)^{-n}$ para $\psi > \psi_{res}$
Modelos estatísticos baseados na curva característica	
Childs e Collis-George (1950)	$k^w(\theta) = k^w_{sat}\frac{\int_{\theta_{res}}^{\theta}\frac{\theta - x}{\psi^2(x)}\,dx}{\int_{\theta_{res}}^{\theta_s}\frac{\theta_s - x}{\psi^2(x)}\,dx}$ x é a variável de integração
Burdine (1953)	$k^w(\theta) = k^w_{sat}\,\Theta^2\int_{\theta_{res}}^{\theta}\frac{d\theta}{\psi(\theta)}\Big/\int_{\theta_{res}}^{\theta}\frac{d\theta}{\psi(\theta)}$
Mualem (1976)	$k^w(\theta) = k^w_{sat}\int_{\theta_{res}}^{\theta}\frac{d\theta}{\psi(\theta)}\Big/\int_{\theta_{res}}^{\theta}\frac{d\theta}{\psi(\theta)}$

A permeabilidade é um parâmetro constante para solos saturados, podendo ser medido experimentalmente a partir de permeâmetros, por exemplo. Porém, para solos não saturados, em que a permeabilidade varia com o conteúdo de água, a determinação experimental da curva de permeabilidade é difícil e onerosa. Os modelos estatísticos utilizam a CCSA para determinar a função de permeabilidade, baseando-se no fato de que ambas, a permeabilidade e a CCSA, são determinadas primariamente pela distribuição da dimensão dos poros do solo. Esses modelos são utilizados quando não se têm dados experimentais da permeabilidade do solo. A Tabela 3 apresenta alguns desses modelos.

É importante ressaltar que a utilização de uma função de condutividade hidráulica é fundamental para a correta representação matemática de problemas de fluxo não confinado. As soluções tradicionais de fluxo não confinado, em que é necessário o estabelecimento da linha freática de forma empírica, são na verdade uma solução incompleta para o problema. Com a adoção de uma função de condutividade hidráulica, não é mais necessária a definição da região de fluxo abaixo da linha freática, e a determinação da linha freática se torna parte do problema.

3.3 Equações para a função de condutividade ao fluxo de ar

A função de condutividade ao fluxo de ar é a relação entre a condutividade ao fluxo de ar e uma variável de estado que descreve a quantidade de ar no solo, direta ou indiretamente. A condutividade ao fluxo de ar decresce com o aumento do grau de saturação do solo, variando, portanto, de forma inversa à condutividade hidráulica.

Várias relações empíricas entre a condutividade ao fluxo de ar e o grau de saturação de ar foram propostas na literatura, muitas pelos mesmos autores que investigaram a condutividade hidráulica do solo não saturado. A Tabela 4 apresenta dois importantes modelos encontrados na literatura, os quais são de fácil aplicação.

Tabela 4. Modelos para a descrição da função de condutividade ao fluxo de ar.

Brooks e Corey (1964)	$k^a = k^d (1 - S_e)^2 (1 - S_e^{(2+\lambda)/\lambda})$
Van Genuchten (1980) – Mualen (1976)	$k^a = k^d (1 - S_e)^{1/2} (1 - S_e^{1/q})^{2q}$

Em que: k^d é a condutividade ao fluxo de ar do solo seco; S^e é o grau de saturação efetivo; λ é o índice de distribuição de poros; q é um parâmetro que depende da distribuição de poros do solo e que varia de 0 a 1.

3.4 Curva característica solo-ar

A curva característica solo-água já é bem conhecida e é dada pela relação entre o grau de saturação da água e sucção matricial ou conteúdo volumétrico de água e sucção matricial ou ainda umidade gravimétrica e sucção. A sucção total é a sucção matricial acrescida da sucção osmótica π, $\psi = (u_a - u_w) + \pi$.

A relação utilizada para descrever o grau de saturação do ar e a sucção matricial é chamada de curva característica solo ar. Essa curva possibilita a construção da função de permeabilidade do ar. Sabendo que S é o grau de saturação em relação à fase água, pode-se definir S_{ar} com sendo o grau de saturação em relação à fase ar. De forma semelhante, pode-se definir o teor de umidade volumétrica em relação à água θ e o teor de umidade volumétrica em relação à fase ar, θ_{ar}. As equações a seguir representam a relação entre a curva característica solo-água e a curva característica solo-ar:

$$S_{ar}(\psi) = 1 - S(\psi) \tag{13}$$

$$\theta_{ar} = \frac{e}{1+e} - \theta(\psi) \tag{14}$$

O grau de saturação da água e a sucção matricial é uma relação que pode ser bem representada pela curva característica solo-água. Em altas sucções, acima de 1500 kPa, a sucção matricial e total podem ser consideradas como equivalentes (BA-TE *et al.*, 2005).

Para estabelecer a relação entre as curvas características de solo água e solo-ar, Ba-Te *et al.* (2005) apresentam estudos, realizados por Fredlund e Xing (1994), de previsão e medida de curvas características solo-água e solo-ar. A Figura 5 apresenta os resultados desses estudos.

5 Conclusões

Este capítulo apresentou os fundamentos da modelagem do fluxo de água e ar em solos não saturados. A compreensão dos mecanismos de fluxo de água e ar é indispensável para a modelagem de estruturas de infiltração. Foram apresentadas as equações governantes em coordenadas cartesianas e cilíndricas. As formulações foram inicialmente desenvolvidas

para condições genéricas, livres de significantes simplificações. Versões mais simplificadas das equações governantes foram apresentadas e discutidas. Finalmente, foi apresentada uma discussão a respeito das principais propriedades de solos não saturados envolvidos na simulação de fluxo e foram discutidas alternativas de modelagem dessas propriedades.

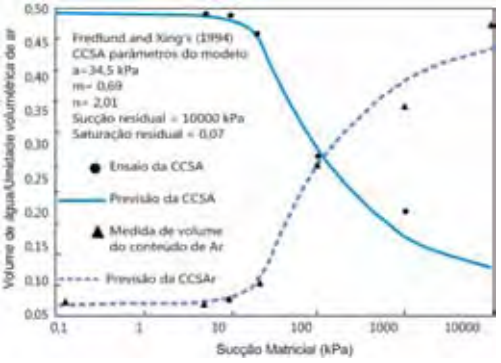


Figura 5. Resultados de ensaios previstos e medidos para as curvas características solo-água e solo-ar. (modificados de BA-TE *et al.*, 2005).

Referências bibliográficas

AVERJANOV, S. F. (1950). About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation, English Collection, 7, 19–21, 1950 (as quoted by Palubarinova, P. Ya.: The theory of ground wa10ter movement (English translation by DeWiest, I. M. R.), Princeton University Press, Princeton,NJ, 1962.

BA-TE; ZHANG, L.; FREDLUND, D. G. (2005). A general air-phase permeability function for airflow through unsaturated soils. American Society of Civil Engineers, *Proc., 2005 AS Geo--Frontiers*, ASCE, Reston, Va, p. 11.

BEAR, J. (1972). Dynamic of fluids in porous media. Dover Science, New York, USA, 714p.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Hydrology. Colorado State University, Fort Collins, Colorado. v. 27, n. 3.

BRUTSAERT, W. (1966). Probability laws for pore-size distribution. Soil Sci., v. 101, p. 85-92.

BURDINE, N. T. (1953). Relative permeability calculation from pore-size distribution data. Petroleum Transactions, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, v. 198, p.71-78.

CAMPBELL, J. D. (1973). Pore pressures and volume changes in unsaturated soils. PhD thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, ILL.

CARVALHO, E. T. L.(2008).Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na Zona Norte da cidade de Goiânia. Goiância: UFG. 222 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CHILDS, E. C; COLLINS-GEORGE,G.N. (1950). The permeability of porous materials. Proc. Roy. Soc., London Series A., v. 201, p. 391-405.

DAVIDSON, J. M.; STONE, L. R.; NIELSON, D. R.; LAURUE, M. E. (1969). Field measurement and use of soil properties. Water Research, Washington. v. 5, p. 1312-1321.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc., New Jersey, USA, 604p.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). Soil Mechanics for unsaturated soils. 1. ed., Canada: John Wiley & Sons, 490 p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 521-532.

FREDLUND, D. G.; XING, A; HUANG, S. (1994) Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Canada, v. 31, p. 533-546.

GARDNER, W. R. (1956).Calculation of capillary conductivity pressure plate outflow data. Soil Science Society of american, v. 20, n. 3, p. 317-320.

GARDNER, W. R. (1958). Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, v. 85, p. 228-232.

GITIRANA JR., G. F. N. (2005). Weather-related geo-hazard assessment model for railway embankment stability. 411 p. Tese (Doutorado, College of Graduate Studies and Research, University of Saskatchewan, Saskatoon.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. (2004). Soil-water characteristic curve with independent properties. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, [s.l.], v. 130, n. 2, p. 209-212.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G.; LIMA, M. C. G. (2006). Fluxo em solos não saturados e o processo erosivo. *In*: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.) Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. 1. ed. Brasília: FINATEC. v. 1, p. 285-317.

MACKEE, C. R.; BUMB, A. C. (1984). The importance of usantureted flow patameters in desifning a monitoring system for a hazardous Waste Site. Proc. National Conf. on Hazardous Waste and Environmental Emergencies, Houston, Texas, March 1984 (sponsored by the Hazardous Materials Control Research Institute), p. 50-58.

MACKEE, C. R.; BUMB, A. C. (1987). Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. SPE Formation Evaluation, p. 599-608.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. (2005). Fundamentals of soil behavior. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 558 p.

MUALEM, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, v. 12, n. 13. p. 1248-1254.

NASCIMENTO, B.B. (2011). Aplicação de um solucionador de EDPs genéricas em análise de fluxo em obras geotécnicas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

RICHARDS, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, v.1, p. 318-333.

RICHARDS, S.; WEEKS, L. (1952). Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurements on soil columns. Soil Sci. Soc. Am. Proc., v. 17, p. 206-209.

RIJTEMA, P. E. (1959). Calculation of capillary condutivity from pressure plate outflow data with non-negligible membrande impedande. Neth. J. of Sci., n. 7, p. 209-215.

RIJTEMA, P. E. (1965). Analysis of actual evapotranspiration. Thesis Wageningen, V.L.O. n. 659, Pudoc, Wageningen.

SILLERS, W. S.; FREDLUND, D. G. (2001). Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering. Canadian Geotechnical Journal**,** Canada, v. 38, p. 1297-1313.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated. Soils**.** Soil Science Society of America Journal, v. 44, p. 892-898.

WILLIANS, G. A.; MILLER, C. T. (1999). An evaluation of temporally adaptative transformation approaches for solving Richard's equation. Advances in Water Resources, [s.l.], v. 22, n. 8, p. 831-840.

WIND, G. P. (1955). A field experiment concerning capillary rise of moisture in a heavy clay soil. Neth. J. of Agr. Sci. n. 3, p. 60-69.

Capítulo 15
Análise numérica de processos de infiltração em mesoescala

Raul Durand
Márcio Muniz de Farias
José Camapum de Carvalho

1 Introdução

O estudo e a previsão da infiltração no solo são importantes na destinação de águas pluviais em centros urbanos, bem como na redução de vazões de pico e no estudo de plumas de contaminação. No estudo, é importante considerar a capacidade de infiltração do material. Frequentemente, os volumes de infiltração são avaliados utilizando métodos semianalíticos e/ou empíricos (JONASSON, 1984; LEEFLANG *et al*., 1998; URBONAS e STAHRE, 1993) e em alguns casos por meio de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos - MEF (ZIMMER *et al*., 1999; DUCHENE *et al*., 1994). Também podem ser considerados modelos analíticos, como os de Corradini *et al.* (2004) e Browne *et al.* (2008), baseados na equação de Richards (1931).

Todas as abordagens anteriormente citadas analisam o fluxo considerando o solo como um meio contínuo, utilizando parâmetros como a permeabilidade e o coeficiente de escoamento do material. Esses métodos são baseados em observações macroscópicas. As variáveis utilizadas em nível macroscópico usualmente são a pressão e a velocidade de fluxo, as quais são relacionadas por meio de propriedades do solo como a permeabilidade. A mecânica dos solos não saturados adiciona a variável de sucção para levar em conta o fluxo multifásico no meio poroso. Entretanto, esses modelos macroscópicos não levam em consideração a física microscópica envolvida no fluxo no interior dos vazios do solo, como a existência de capilaridade e de tensão superficial, fenômenos que podem estabelecer caminhos preferenciais para o fluxo em um meio essencialmente heterogêneo. Eles também não levam em conta a distribuição de poros, a qual assume grande importância nos solos profundamente intemperizados.

Atualmente, existem métodos numéricos que permitem a simulação de fluxo em escala de grãos (mesoescala) como o Método *Lattice Gas Automata* (LGA, em inglês) e o Método Lattice-Boltzmann (MLB), os quais vêm evoluindo recentemente com aplicações para o estudo de fluxo em meios porosos (WOLF e PHILIPI, 2003; SANTOS *et al*., 2005; PICO *et al*., 2005; WOLF *et al*., 2008; NABOVATI e SOUSA, 2007). O objetivo da simulação da infiltração por meio de modelos em mesoescala não é analisar o fluxo microscópico em domínios de escala real, mas estudar o efeito dos fenômenos existentes em pequena escala no comportamento macroscópico de forma que possam ser associadas características intrínsecas do meio

e do fluido, como viscosidade, porosidade e granulometria, com parâmetros macroscópicos como a capacidade de infiltração.

Os métodos em mesoescala vêm ganhando espaço em aplicações de Geotecnia pela facilidade de se adaptar a arranjos complexos de partículas como no meio poroso. Embora esse tipo de análise seja mais custoso computacionalmente, razão pela qual não aplicável ainda para simular modelos práticos, é possível simular pequenos domínios onde se pode realizar o estudo mais detalhado do processo de transporte de fluidos. Simulações em mesoescala podem ser aplicadas ao fenômeno de infiltração no solo, no intuito de avaliar não só a velocidade e a capacidade de infiltração, como também o potencial de erosão de acordo com a velocidade do fluxo. Características físicas, como a granulometria, textura do material e teor de umidade inicial, exercem grande importância nesse tipo de análise. A realização de análises numéricas considerando diferentes tipos de material pode mostrar aqueles que apresentam melhores condições de infiltração e os de maior potencial de erosão. O melhor entendimento dos processos de infiltração e erosão, obtido com o auxílio de análises em mesoescala, pode contribuir na elaboração de obras de infiltração em aspectos como seleção de materiais, dimensionamento e técnicas de construção, assim como na elaboração de medidas que melhorem a drenabilidade de solos e aterros existentes. A abordagem aqui apresentada não desce ao nível de detalhe em que se separam aspectos estruturais como os de micro e macroporosidade que marcam muitos solos tropicais.

2 Infiltração em mesoescala

O meio poroso desempenha um papel fundamental na infiltração, uma vez que as suas características conjuntamente com as propriedades do fluido percolante são determinantes no processo de infiltração. As propriedades mais importantes do meio poroso relativas à infiltração em mesoescala são: o índice de vazios, a distribuição dos poros, a granulometria, a geometria dos grãos e dos canalículos e o conteúdo inicial de água e/ou contaminante. Muitas dessas propriedades dependem não apenas do processo de formação do solo, mas também do modo de uso do solo, que pode mudar drasticamente o processo de infiltração superficial em áreas tanto rurais como urbanas.

O índice de vazios geralmente é tratado como diretamente associado com a permeabilidade intrínseca, pois os vazios fornecem espaço para a passagem do fluido. Além disso, esse índice está relacionado com a capacidade de armazenamento do solo. Entretanto, seria necessário, no caso dos solos tropicais profundamente intemperizados, levar em conta a distribuição de poros, pois geralmente os agregados possuem microporos que, embora armazenem água, praticamente não se prestam ao fluxo de água no processo de infiltração. Este capítulo, no entanto, não desce a este nível de detalhe, considerando apenas os poros entre grãos. Por sua vez, a granulometria das partículas fornece informação acerca da superfície específica sem que traduza, no entanto, a natureza mineralógica do solo. Solos finos apresentam superfície específica elevada onde o fluido pode ser retido por adsorção. Além disso, a granulometria conjuntamente com o grau de acomodação das partículas fornecem diversos arranjos ao meio poroso, de modo a apresentar caminhos preferenciais ou canalículos tortuosos para a passagem de gases e líquidos. Em geral, menores índices de vazios fornecem maior tortuosidade

para o fluxo, reduzindo a velocidade e aumentando o tempo de infiltração. Cabe destacar, no entanto, que o arranjo estrutural trabalha acoplado ao índice de vazios na definição da capacidade de infiltração.

Nas análises numéricas de infiltração em mesoescala, é necessário definir inicialmente o arranjo de partículas que caracteriza a "geometria" do domínio, ou seja, o meio poroso. Essa geometria pode ser obtida com o processamento digital de microfotografias do solo (MENZEL *et al.*, 1998) ou com o uso de procedimentos numéricos que geram artificialmente geometrias que representam o meio poroso sem que entre em detalhes sobre a microporosidade interna a agregados de solos tropicais profundamente intemperizados. A forma mais fácil de geração artificial, embora simplificada, é dada pela disposição de figuras geométricas, por exemplo, pelo posicionamento de círculos de maneira sistemática com tamanhos e espaçamentos predefinidos visando obter uma determinada porosidade e nível de tortuosidade (SUKOP e OR, 2003; PICO *et al.*, 2005). A geração artificial pode também ser realizada utilizando meios mais sofisticados, como a teoria dos fractais (PERRIER *et al.*, 1999; RAPPOLDT e CRAWFORD, 1999; WU *et al.*, 2004), em que um dos objetivos principais é atingir um valor de porosidade ou índice de vazios preestabelecido. A Figura 1 mostra três tipos de geometria obtidos artificialmente, sendo os dois primeiros obtidos pela utilização de fractais e o último por meio da disposição regular de círculos. Observa-se nas três figuras que o nível de detalhe é macroestrutural.

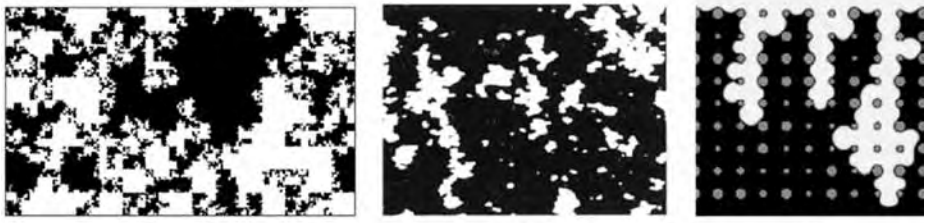


Figura 1. Geometrias de meios porosos gerados artificialmente: a) Rappoldt e Crawford (1999); b) Wu *et al.* (2004); c) Sukop e Or (2003).

A quantidade de água infiltrada depende da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da superfície, da umidade do solo, da forma, do tamanho e da distribuição dos poros, etc. De acordo com Brandão *et al.* (2006), enquanto existe aporte de água, o perfil de umidade do solo tende à saturação, sendo a camada superficial a primeira a saturar. Quando o aporte de água na superfície cessa e deixa de haver infiltração, a umidade no interior do solo se redistribui, evoluindo para um perfil de umidade inverso, com menores teores de umidade nas camadas superficiais e maiores nas camadas mais profundas. Ocorre, nessa redistribuição de umidade, um balanço entre a energia gravitacional atuante na água e a energia de sucção ou capilaridade atuante no solo.

À medida que diminui o teor de umidade (ou o grau de saturação), o ar tende a ocupar os poros previamente ocupados pela água. De acordo com Philip (1969, *apud* JUCÁ, 1993), isso conduz a uma rápida diminuição da secção disponível para o fluxo de água, pois o ar tende a ocupar os poros de maior tamanho. Esse fato faz com que a água flua pelos poros de menor tamanho, incrementando a tortuosidade do fluxo. Isso explicaria, parcialmente, a rápida diminuição da permeabilidade com o aumento da sucção; mas, em análise mais refinada,

seria possível demonstrar que a movimentação da água, dando-se por diferença de energia, conduziria a valores menores de permeabilidade devido à ação de forças de superfície atuante nas partículas de solo. Leong e Rahardjo (1997) apresentam um conjunto de fórmulas empíricas para aproximar o valor da permeabilidade em solo não saturado.

Os modelos em mesoescala precisam atender às equações de Navier-Stokes (ENS) (CHEN *et al*., 1992). As ENS são um conjunto de equações diferenciais parciais (EDP) não lineares que descrevem o fluxo de fluidos Newtonianos. Essas equações podem ter uma grande variedade de aplicações como o fluxo de líquidos, gases, fluxo laminar e turbulento. As ENS são definidas pelas condições de conservação de massa, momento linear e energia, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla)\,\mathbf{v} - \frac{1}{\rho}\nabla \rho + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\mathbf{F}}{\rho} \tag{2}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla s + \frac{Q}{T} \tag{3}$$

Nas equações (1), (2) e (3) usa-se notação simbólica (vetorial), sendo as grandezas vetoriais representadas em negrito e o produto escalar representado pelo ponto ($\cdot$). Usam-se ainda o operador diferencial nabla $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$, que fornece o vetor gradiente de uma função de campo escalar, e o operador Laplaciano $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, que fornece um valor escalar. Com relação às demais grandezas nas equações (1), (2) e (3), tem-se que: ρ é a densidade do fluido, **v** é o vetor de velocidade, t é o tempo, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, **F** é o vetor de força externa que atua sobre o fluido, s é a entropia por unidade de massa, Q é a transferência de calor e T é a temperatura. Para descrever o problema de fluxo formulado nas ENS, é necessário que as propriedades do fluido sejam diferenciáveis e contínuas. Dependendo da geometria do domínio e das condições de contorno, não existe solução analítica para as ENS; por isso, é necessário recorrer a métodos numéricos, tais como o LGA e MLB descritos nas próximas seções.

3 Autômata celular

Um dos primeiros modelos numéricos para simulação de fluxo em mesoescala é o Autômata Celular. Esse modelo representa um sistema dinâmico que evolui em passos discretos. Consiste de uma grelha regular (*lattice*) de células que representam o domínio, onde cada ponto ou nó da célula adota um determinado estado que pode variar ao longo do tempo. O estado de uma célula para um tempo t é definido em função dos estados das células vizinhas no tempo anterior $t - \mathbf{1}$. A evolução dos estados das células é regida por uma mesma regra ou função de transição f. Cada vez que essa regra é aplicada sobre todas as células, a grelha é atualizada e uma nova configuração ou "geração" é obtida.

Uma das formas mais simples de autômata celular é considerar uma grelha unidimensional formada por uma sequência de células (pontos) cujos estados podem ser caracterizados

por 0 e 1. A Figura 2 mostra um exemplo de evolução de uma grelha 1D cujo estado inicial é dado na primeira linha. A regra de evolução fornece o estado em um ponto para um passo de tempo avante, em função do estado atual do ponto e de seus vizinhos à esquerda e à direita. A regra de evolução para esse caso é dada pelas seguintes funções, cujos argumentos representam os estados dos três pontos adjacentes:

$f(1,0,\mathbf{0}) = \mathbf{1}$ $\quad$ $f(0,1,\mathbf{0}) = \mathbf{0}$
$f(0,0,\mathbf{1}) = \mathbf{1}$ $\quad$ $f(1,0,\mathbf{1}) = \mathbf{0}$
$f(0,0,\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ $\quad$ $f(1,1,\mathbf{0}) = \mathbf{0}$
$f(0,1,\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ $\quad$ $f(1,1,\mathbf{1}) = \mathbf{0}$

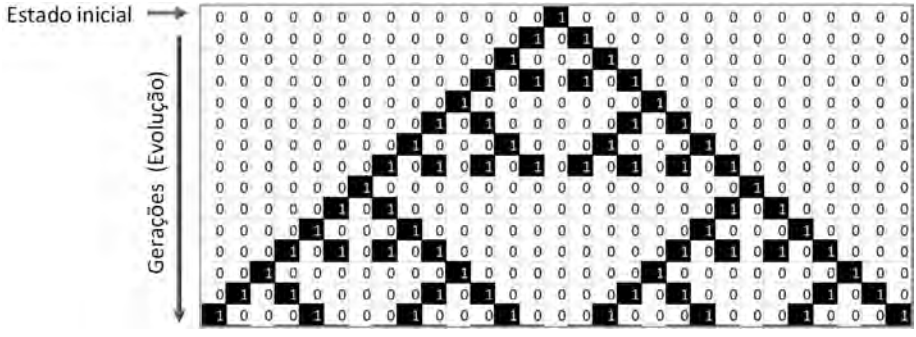


Figura 2. Evolução de um modelo celular autômato unidimensional.

Os modelos autômatos podem ser utilizados para representar fenômenos físicos. Frisch, Hasslacher e Pomeau (1986) apresentaram um modelo de autômata celular 2D para resolver as equações de Navier-Stokes e representar o movimento de gases, o que deu origem ao método *Lattice Gas Automata* (LGA) ou *Lattice Gas Celular Automata* (LGCA). Esse método é baseado na teoria cinética dos gases e consiste em um sistema de partículas que se movem com velocidades discretas entre os nós de uma malha regular hexagonal (Figura 3), onde a massa e o momento linear são conservados. O movimento de partículas através dos nós consegue reproduzir estatisticamente o comportamento de gases e fluidos. Para cada nó, o campo de velocidades é discretizado em seis direções. Cada direção pode conter ou não uma partícula em movimento. A presença ou ausência de partículas em movimento numa determinada direção é representada por uma variável *booleana* (0 ou 1).

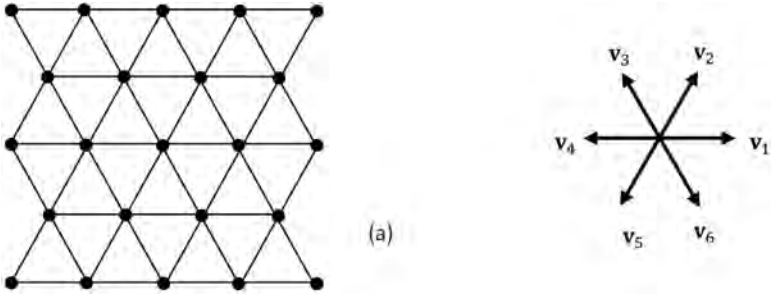


Figura 3. Discretização do espaço (a) e das velocidades (b) para o modelo hexagonal pelo MLGA.

A evolução de um modelo LGA é realizada em duas etapas para cada iteração (Figura 4). A primeira etapa é dada pela propagação das partículas nos nós para os nós vizinhos de acordo com suas velocidades prévias. A segunda é dada pela colisão de partículas em um determinado nó e a obtenção das novas direções de velocidade de acordo com as regras de colisão. A Figura 4b mostra os casos de colisão entre duas e três partículas onde a conservação de massa e de momento é garantida.

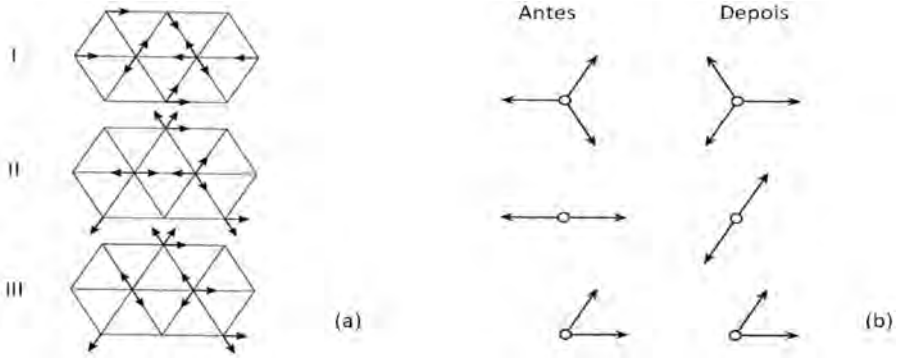


Figura 4. Um passo de tempo pelo MLGA representando: (a) a condição inicial (I), a propagação (II) e o resultado das colisões (III); e (b) exemplos de possíveis colisões (ROTHMAN, 1988).

Uma das características mais importantes do MLGA é a facilidade de simulação de fluxo em geometrias complexas. Essa facilidade permite o estudo da percolação em meio poroso em escala mesoscópica. Um exemplo da simulação bidimensional de fluxo saturado em meio poroso é mostrado na Figura 5. Esse tipo de simulação atende à lei de Darcy e permite realizar uma estimativa da permeabilidade do meio. É possível imaginar, nesse meio poroso, os elementos sólidos constituídos por micropartículas, como, por exemplo, partículas de argila, e microporos. Observa-se, então, que o fluxo se dará através da macro e mesoporosidade, sendo esta consideração importante no trato dos solos tropicais profundamente intemperizados constituídos, dentre outros, por agregados de argila. A energia de retenção de água no interior dos microporos é muito superior à dos macroporos, direcionando, assim, o fluxo através destes últimos.

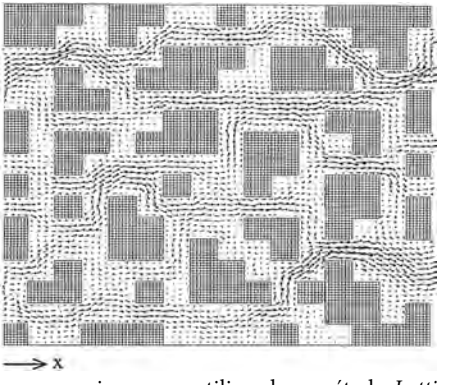


Figura 5. Simulação de fluxo em meio poroso utilizando o método *Lattice Gas Automata* (ROTHMAN, 1988).

4 Método Lattice-Boltzmann

O método Lattice-Boltzmann (MLB) é uma versão melhorada do MLGA, no qual, em lugar de partículas discretas, utilizam-se distribuições de partículas baseadas na equação de transporte de Boltzmann (MCNAMARA e ZANETTI, 1988). O MLB é uma técnica relativamente recente e tem se mostrado, em alguns casos, tão acurada quanto métodos da Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC). Os métodos numéricos baseados na equação de Boltzmann simplificam consideravelmente a visão conceitual original de Boltzmann por meio da redução das possíveis posições e momentos de uma partícula de um meio contínuo para um conjunto de velocidades discretas. O espaço é discretizado para uma grelha regular, e a velocidade é discretizada para um conjunto finito de direções. Os modelos no MLB mais frequentemente utilizados são o D2Q9 (Figura 6), com nove direções de velocidade no espaço bidimensional, e o D3Q27, com 27 direções no espaço tridimensional.

As variáveis de estado são definidas em cada nó da grelha (densidade e velocidade). A cada incremento de tempo, a massa em cada nó se movimenta nas direções correspondentes às direções de velocidade (propagação), chegando até os nós vizinhos. Em seguida, partículas provenientes de diferentes direções chegam a cada nó. Então uma regra de colisão é aplicada, a qual redistribui as partículas de modo que as leis de conservação, para massa e momento linear, sejam satisfeitas. Apesar da simplicidade, esse modelo discreto satisfaz adequadamente as equações de Navier-Stokes para a dinâmica de fluidos. Viggem (2009) apresenta uma extensiva demonstração da obtenção das equações de Navier-Stokes a partir das equações do MLB.

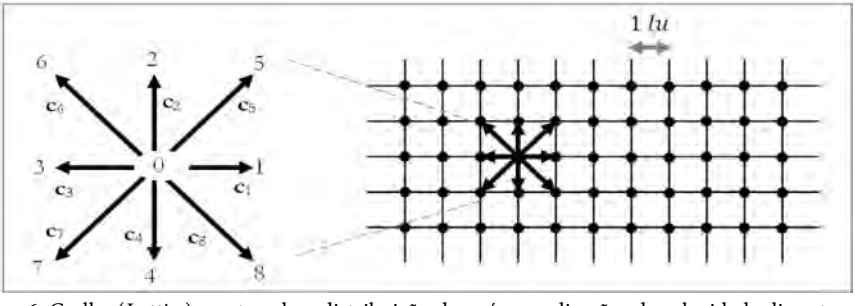


Figura 6. Grelha (*Lattice*) mostrando a distribuição dos nós e as direções de velocidade discretas para o modelo D2Q9.

Pesquisadores têm usado o MLB em uma variedade de problemas de fluxo. Shan e Chen (1993) apresentaram um modelo para simular a separação de fases, líquido e vapor, com base num potencial de interação, de modo a calcular forças de atração entre partículas de fluido. De maneira similar ao trabalho de Shan e Chen (1993), Martys e Chen (1996) apresentaram um modelo para simular vários componentes de fluido, considerando, dessa vez, forças de interação entre componentes. Martys e Chen (1996) e Raiskinmaki *et al.* (2000) utilizaram uma formulação similar à de Shan e Chen (1993) para modelar a interação fluido-sólido, o que possibilitou simulação de molhabilidade e fenômenos como a ascensão capilar. Por sua vez, McNamara *et al.* (1997) apresentaram um modelo que permite simular a transferência de calor no fluido sem violar as ENS.

4.1 Formulação básica do MLB

Como a equação de Boltzmann, o MLB está formulado na escala mesoscópica, na qual a descrição do sistema é feita por meio de funções de distribuição, $f_i(x, t)$, que representam o valor esperado do número de partículas com velocidade $\mathbf{c}_i$ em um ponto $\mathbf{x}$ no tempo t, onde $i = 0,..., n$ representa as direções de velocidade. No MLB, as partículas são restritas a uma rede discreta, de forma que estas podem se deslocar somente num número finito n de direções e com um número limitado de velocidades. Dessa forma, tanto o espaço físico quanto o de velocidades é discretizado. A Figura 7 apresenta um reticulado (*lattice*) regular mostrando as direções de velocidade $\mathbf{c}_i$ correspondentes ao modelo D2Q9. Ainda nesta figura tem-se que o vetor central $\mathbf{c}_0$ está associado com as partículas em repouso. A distância entre dois nós da grelha é denominada Δx. Seu comprimento é igual a 1 *lu* (*uma unidade lattice*) e representa a medida fundamental no MLB. Os avanços de tempo Δt são considerados iguais a 1 *tu* (*uma unidade de tempo*). De modo semelhante, todas as demais grandezas físicas (densidade, velocidades, aceleração etc.) definidas a seguir são adimensionais, e sua transformação para unidades físicas será discutida na subseção 4.3.

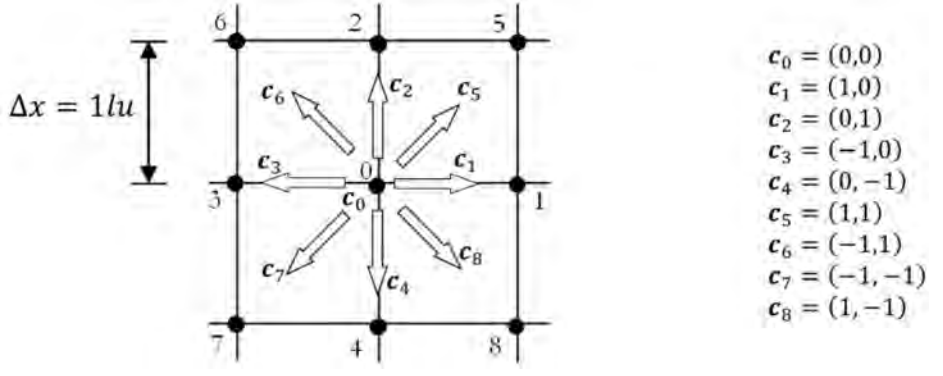


Figura 7. Malha bidimensional com 9 velocidades (D2Q9). A direção zero está associada com as partículas em repouso.

A densidade macroscópica do fluido para um dado nó (ou seja, o número de partículas concentradas em um ponto) é obtida pela soma dos valores das funções de distribuição associadas a esse nó:

$$\rho(x) = \sum_i f_i \tag{4}$$

Por sua vez, a velocidade macroscópica do fluido corresponde à média das velocidades $\mathbf{c}_i$ ponderada pelas funções de distribuição:

$$\mathbf{v} = \frac{\Sigma_i f_i \mathbf{c}_i}{\Sigma_i f_i} = \frac{1}{\rho} \sum_i f_i \mathbf{c}_i \tag{5}$$

Note-se que, apesar de as velocidades microscópicas terem direções discretas restritas a um número fixo de possibilidades, como ilustrado na Figura 7 para o modelo D2Q9, a veloci-

dade macroscópica fornecida pela Equação (5) pode ocorrer em qualquer direção em função da ponderação pelo número de partículas que escoa em cada direção discreta.

Os processos de propagação e colisão, que caracterizam o MLB, em cada intervalo de tempo Δt, podem ser representados pelas seguintes equações:

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = \Omega_i \tag{6}$$

$$\sum_i \Omega_i = 0; \qquad \sum_i \Omega_i \mathbf{c}_i = 0 \tag{7}$$

em que Ω_i é denominado de operador de colisão. Esse operador deve ser escolhido de forma a conservar a massa e o momento linear, além da energia total em problemas não isotérmicos, Eq. (7).

A forma mais simples de considerar o efeito das colisões entre partículas é utilizar o operador BGK (BHATNAGAR *et al*., 1954). Esse operador descreve a colisão como um processo de relaxação em direção de um estado de equilíbrio local, por exemplo, a condição hidrostática, o estado de fluxo estacionário, etc. A expressão que descreve este operador é dada pela Equação (8), em que τ é denominado de tempo de relaxação e f_i^{eq} é a função de distribuição de equilíbrio na direção *i*.

$$\Omega_i = -\frac{1}{\tau}(f_i - f_i^{eq}) \tag{8}$$

Combinando as Equações (6) e (8), a equação mesoscópica governante para o MLB pode ser escrita como:

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau}(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) \tag{9}$$

O comportamento macroscópico pode ser determinado com a escolha adequada da distribuição de equilíbrio, $f_i^{eq}(\rho, \mathbf{v})$, para resgatar a dinâmica de fluidos regida pelas ENS. Para esse fim, de acordo com Qian *et al.* (1992), a distribuição de equilíbrio é dada por:

$$f_i^{eq} = \rho w_i \left[1 + \frac{3\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{v}}{c^2} + \frac{9(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{v})^2}{2c^4} - \frac{3(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})^2}{2c^2}\right] \tag{10}$$

em que $c = \frac{\Delta t}{\Delta x} = 1\ lt\ tu^{-1}$ e w_i são pesos associados com cada direção de velocidade *i*. Para o modelo D2Q9, os pesos são dados por $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = \frac{1}{9}$, $w_5 = w_6 = w_7 = w_8 = \frac{1}{36}$ e $w_0 = \frac{4}{9}$. Esses pesos são escolhidos de forma a garantir isotropia macroscópica e invariância Galileana (QIAN *et al*., 1992).

No modelo D2Q9, a viscosidade do fluido pode ser associada com o tempo de relaxação por meio da Equação (11). Dessa forma, simulações pelo MLB podem estimar o tempo de relaxação a partir da viscosidade.

$$\nu = \frac{1}{3}(\tau - \frac{1}{2}) \tag{11}$$

Os passos básicos na simulação pelo MLB são mostrados no algoritmo da Figura 8.

Entrada: Valores iniciais de ρ e $\mathbf{v}$
Saída: Valores atualizados de ρ e $\mathbf{v}$ para cada passo de tempo

Inicializar: ρ, $\mathbf{v}$, f_i^{eq} (ρ, $\mathbf{v}$) e $t = 0$	!Condições iniciais e tempo.
Inicializar: $f_i \leftarrow f_i^{eq}$	!Inicialização das funções de distribuição para todos os nós
Repetir:	!Processo iterativo
| $t \leftarrow t + \Delta t$	*!Atualização do tempo.* $\Delta t = 1$ *tu.*
| Propagação: $f_i \rightarrow f_i^{\star}$	*!Propagação de* f_i *para os nós vizinhos obtendo* $f_i^{\star}$ *(Figura 9).*
| Calcular ρ e $\mathbf{v}$	*!Atualização de* ρ *e* $\mathbf{v}$ *com os novos valores de* f_i*, Eqs. (4) e (5).*
| Calcular f_i^{eq}	*!Cálculo de* f_i^{eq} *com os novos valores de* ρ *e* $\mathbf{v}$*, Eq. (10).*
|Colisão $f_i = f_i^{\star} - \frac{1}{\tau}(f_i^{\star} - f_i^{eq})$	!Eq. (9)
| Condições de contorno|	*!Aplicação das condições de velocidade e densidade prescritas além das condições bounce-back (Figura 9).*
| Imprimir ρ e $\mathbf{v}$	!Visualização dos resultados para densidade e velocidade.

Figura 8. Algoritmo básico do Método Lattice-Boltzmann.

Sukop e Or (2004) consideram a possibilidade de aplicação de forças de gravidade por meio de um termo de velocidade Δu dado por:

$$\Delta \mathbf{u} = \tau \mathbf{F}/\rho \tag{12}$$

Essa variação na velocidade é adicionada à velocidade de equilíbrio, conforme Equação (13), que é posteriormente utilizada no cálculo da função de distribuição de equilíbrio, Equação (10).

$$\mathbf{u}_{eq} = \mathbf{u} + \tau \mathbf{F}/\rho \tag{13}$$

Buick e Greated (2000) analisaram este e outros métodos de introduzir forças de gravidade destacando as diferenças nas abordagens para fluidos incompressíveis e compressíveis. Por sua vez, Guo *et al.* (2002) analisaram vários métodos para aplicar forças externas no MLB e destacaram a importância de os métodos atenderem às ENS.

4.2 Condições de contorno

No MLB, as condições de contorno são dadas pela aplicação de valores prescritos de velocidade de fluxo (condições de Von Newman) e de densidade (condições de Dirichlet). Tanto velocidades quanto densidades prescritas no contorno são convertidas em termos de funções de distribuição. Uma das formas mais utilizadas para aplicar as condições de contorno é a proposta por Zou e He (1997).

A existência de superfícies sólidas no domínio, como é o caso do meio poroso, requer que alguns nós sejam tratados como sólidos. Nesse caso, o processo de propagação desses nós deve ser alterado de forma a evitar a passagem de fluido. Esse procedimento é realizado com a aplicação da condição de contorno conhecida como *bounce-back*, que consiste em inverter a distribuição de partículas na direção contrária à superfície sólida (SUCCI, 2001; SUKOP e OR, 2004), como mostra a Figura 9.

Existem casos em que se deseja representar um meio que não seja afetado pelas condições de fronteira. Nesses casos, utiliza-se a condição de contorno denominada contínua. Tal condição consiste em conectar os lados superior e inferior e/ou os lados direito e esquerdo do domínio, de forma a representar um meio infinito.

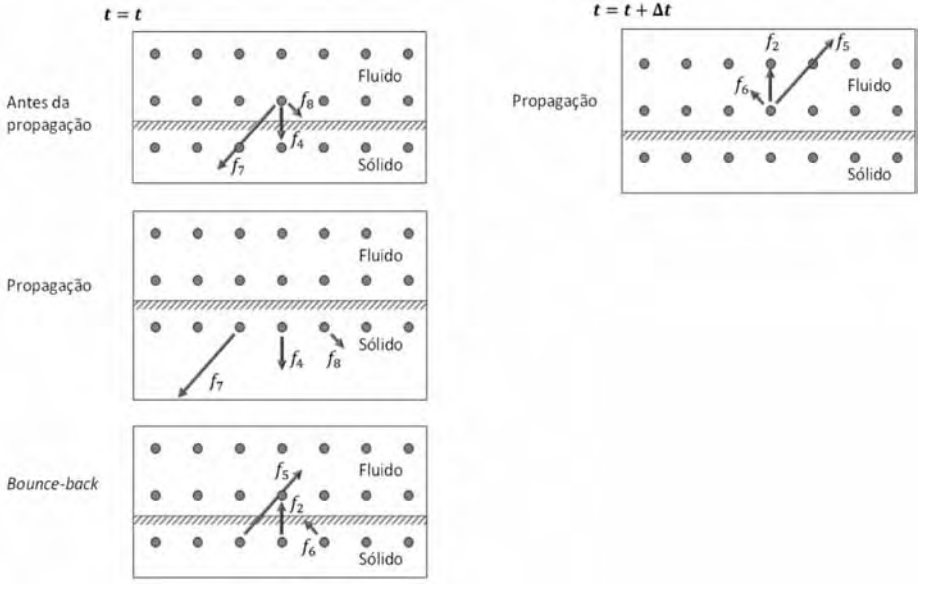


Figura 9. Ilustração do mecanismo da condição de contorno *bounce-back* após o processo de propagação (adaptado de SUKOP e OR, 2004).

4.3 Relação entre unidades de rede (lattice) e unidades físicas

O MLB opera em um sistema normalizado de unidades no qual a distância entre dois nós é igual a $\Delta x = 1$ *lu* e o incremento de tempo entre duas iterações é dado por $\Delta t = 1$ *tu*. Frequentemente, é conveniente comparar a física simulada com resultados experimentais ou analíticos. Uma forma de relacionar uma simulação pelo MLB com um caso real é a uniformização de parâmetros adimensionais que governam um dado fenômeno físico, como, por exemplo, o número de Reynolds. Por outro lado, podem-se utilizar as relações entre as unidades físicas e as unidades de rede.

Em geral, a conversão de unidades físicas em unidades de rede e vice-versa requer um procedimento padronizado. A Tabela 1 mostra a relação entre unidades físicas e unidades de rede. As variáveis com uma barra em cima representam medidas físicas.

Tabela 1. Conversão entre unidades físicas e unidades de rede em 2D.

	Medida física	Medida de rede	Relação
Comprimento	$\Delta x = \overline{h}$	$h = 1$	–
Tempo	$\Delta \overline{t}$	$\Delta t = 1$	–
Velocidade escalar	$\overline{c} = \frac{\overline{h}}{\Delta \overline{t}}$	$c = 1$	–
Vetor posição	$\overline{\mathbf{x}}$	$\mathbf{x}$	$\overline{\mathbf{x}} = \overline{h}\mathbf{x}$
Vetor velocidade	$\overline{\mathbf{v}}$	$\mathbf{v}$	$\overline{\mathbf{v}} = \overline{c}\mathbf{v}$
Vetor aceleração	$\overline{\mathbf{a}}$	$\mathbf{a}$	$\overline{\mathbf{a}} = (\overline{c}/\Delta\overline{t})\,\mathbf{a}$
Viscosidade cinética	$\overline{\nu} = \frac{1}{3}\left(\tau - \frac{1}{2}\right)\frac{\overline{h}^2}{\Delta \overline{t}}$	$\nu = \frac{1}{3}\left(\tau - \frac{1}{2}\right)$	$\overline{\nu} = \frac{\overline{h}^2}{\Delta \overline{t}}\,\nu$
Densidade	$\overline{\rho}$	ρ	$\overline{\rho} = \rho_0 \rho$
Massa	$\overline{m}$	m	$\overline{m} = \rho_0\, \overline{h}^2 m$

4.4 Análises monofásicas

Análises monofásicas podem ser úteis para reproduzir fenômenos em regime saturado. Uma das simulações mais simples realizadas com o MLB é a geração de vórtices no fluxo entre duas placas com um obstáculo entre elas. Esse fenômeno foi extensamente estudado por vários autores e é utilizado como um referência (*benchmark*) na implementação de códigos computacionais do MLB.

A Figura 10 mostra um exemplo da geometria e dos resultados obtidos na simulação desse fenômeno. O fluxo vai da esquerda para a direita. O lado esquerdo tem velocidade prescrita e o direito densidade prescrita. A simulação é realizada em várias iterações que comprendem os processos de propagação e colisão. Após aproximadamante 1000 iterações, é possível observar a geração de vórtices com o auxílio do campo de rotações. Comparativos quantitativos entre resultados numéricos e experimentais podem ser realizados utilizando a fórmula analítica de Kármán (AREF *et al.*, 2007).

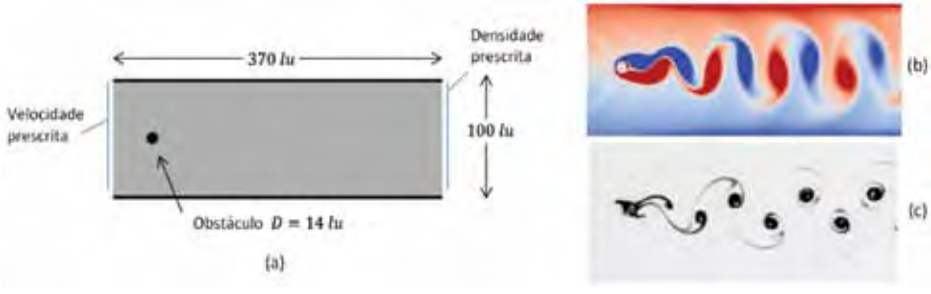


Figura 10. Simulação de vórtices realizada por Durand *et al.* (2011), incluindo (a) a geometria, (b) o resultado numérico e (c) o resultado experimental por Taneda *apud* Sukop e Thorne (2007).

Outra simulação monofásica é dada pelo fluxo de Poiseuille, que representa o fluxo entre duas placas paralelas sob um gradiente de pressão constante, onde o fluxo adota um perfil de velocidade parabólico. O fluxo é unidimensional, incompressível e laminar. Nesse caso, o gradiente de pressão é dado pela ação da gravidade.

Nabovati e Souza (2007) apresentaram um estudo de fluxo em meio poroso saturado por meio do MLB, em que estudaram a permeabilidade e a tortuosidade do fluxo. Os autores concluíram que para a mesma porosidade a permeabilidade de um meio poroso gerado aleatoriamente é menor que a de um meio poroso elaborado de forma ordenada. Por outro lado, independentemente da geometria do meio poroso, a permeabilidade varia exponencialmente com a porosidade. Com relação à tortuosidade, concluíram que quanto maior o fator de forma (definido como a relação entre a altura e a largura) dos obstáculos, maior é a tortuosidade. A Figura 11 mostra o fluxo para diferentes porosidades e diferentes fatores de forma dos obstáculos. Nos perfis de intemperismos presentes nos solos tropicais, elementos como a porosidade, sua distribuição dos poros e tortuosidade variam em função das próprias condições ambientais, tais como drenagem e ação biológica. Por exemplo, nas áreas de cerrado no Planalto Central Brasileiro, a condição de fluxo predominantemente vertical aliada à atuação biológica faz com que o arranjo dos poros na direção vertical seja distinto daquele na direção horizontal. Segundo esse modelo analisado, o estudo da infiltração por meio de estruturas como poços e trincheiras deve levar em conta esses efeitos. Em áreas com geologia estrutural marcada por acamamentos, micro e macrofissuras, esses efeitos devem ser igualmente observados nos projetos de infiltração.

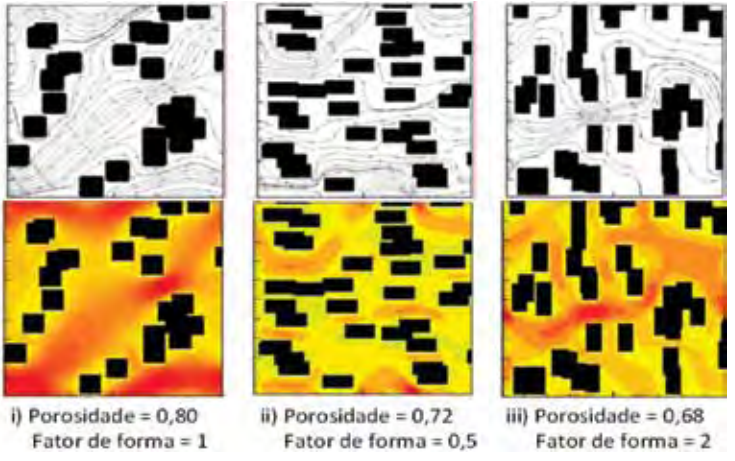


Figura 11. Linhas de fluxo e campo de velocidade para obstáculos dispostos aleatoriamente e com diferentes fatores de forma (NABOVATI e SOUZA, 2007).

4.5 Análises multifase (líquido-gás)

Existem várias técnicas que adaptam o MLB para analisar fluidos em mais de uma fase (água líquida e vapor, por exemplo). Algumas dessas técnicas podem ser encontradas resumidas no trabalho de Rothman e Zaleski (1994). Entretanto, não existe um consenso sobre qual é

o melhor método para análises multifase, dadas as vantagens e desvantagens das abordagens. O objetivo de análises multifase é estudar o comportamento da interação de líquidos e gases e a reprodução da transição de uma fase para outra. O parâmetro básico para a transição entre fases é a temperatura. No modelo de Shan e Chen (1993), o papel da temperatura em processos não isotérmicos é representada por meio do parâmetro de interação *G*. A ideia básica de Shan e Chen é a aplicação de um potencial de interação microscópico entre as partículas vizinhas. Para esse propósito, uma força de atração é adicionada aos nós mais próximos. Para o modelo D2Q9, essa força é dada pela seguinte equação:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, t) = -G\,\psi(\mathbf{x}, t)\sum_{i=0}^{8} w_i\,\psi(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i\,\Delta t, t)\,\mathbf{c}_i \tag{14}$$

sendo w_i os pesos associados com cada direção de velocidade e Ψ uma função que define o potencial de interação. Essa função é definida como:

$$\psi(\rho) = \psi_0 \exp\left(\frac{-\rho_0}{\rho}\right) \tag{15}$$

em que Ψ_0 e ρ_0 são constantes ou parâmetros do material. Outras funções para o potencial de interação podem ser utilizadas.

Por sua vez, a pressão no fluido (P) pode ser associada com a densidade por meio de uma equação de estado. Para o modelo D2Q9, a equação de estado é dada por (HE e DOOLEN, 2002):

$$P = \frac{\rho}{3} + \frac{G}{6}\psi^2(\rho) \tag{16}$$

A força de atração **F**, expressa na Equação (14), aumenta de acordo com a densidade. Dessa forma, uma região densa (líquido) experimenta uma força coesiva maior que uma região menos densa (gás), o que leva à aparição do fenômeno de tensão superficial. A força é adicionada ao sistema de forma similar à Equação (13).

Por outro lado, é possível a simulação de aderência entre as partículas de fluido e as superfícies, o que permite a reprodução de fenômenos como a adsorção e, posteriormente, a ascensão capilar. De acordo com Martys e Chen (1996), o tamanho da força de aderência é proporcional a um coeficiente de adsorção G_s dado pela Equação (17), em que *s* é dado por 1 se ($\mathbf{x} + \mathbf{c}_i\,\Delta t$) corresponde a um nó sólido e zero caso contrário.

$$\mathbf{F}_s(\mathbf{x}, t) = -G_s\,\psi(\mathbf{x}, t)\sum_{i=1}^{8} w_i\,s(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i\,\Delta t, t)\,\mathbf{c}_i \tag{17}$$

A atração de um fluido para uma superfície sólida por aderência constitui um aspecto importante na simulação da infiltração em mesoescala, dado que a fase líquida se adere às partículas sólidas e pode servir como passagem de mais líquidos em direção a outras regiões do solo.

4.5.1 Exemplos de aplicação da análise multifásica

A Figura 12 mostra o resultado de uma simulação multifásica (liquido-gás) em que são representados diferentes ângulos de contato entre uma gota de líquido e uma superfície sólida de acordo com a variação do coeficiente de adsorção G_s. Esta figura mostra também a variação

da densidade ao longo de uma linha vertical que passa pelo meio da gota. Observa-se que a densidade é aproximadamente constante na parte líquida e na parte gasosa,

Por outro lado, análises de fluxo multifásico com apenas um componente são capazes de reproduzir o fenômeno de ascensão capilar. A Figura 13 mostra a geometria e o resultado de uma simulação desse fenômeno. Na análise, inicialmente são dispostos dois fluidos (líquido e gás) com densidades diferentes. Posteriormente, a força da gravidade é aplicada e espera-se até que o sistema entre em equilíbrio, surgindo, assim, a ascensão capilar. Para esse caso, o coeficiente de adsorção foi estimado de forma a manter um ângulo de contato de 0° entre o líquido e as paredes.

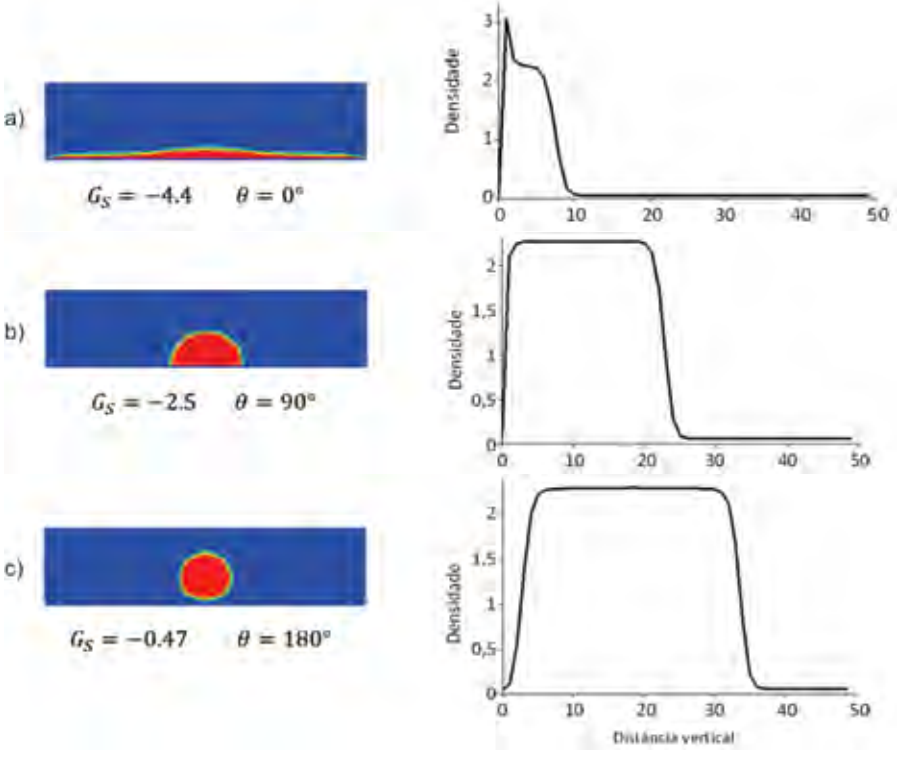


Figura 12. Aderência de uma gota em contato com uma superfície sólida para vários valores de G_s. (DURAND *et al.*, 2011).

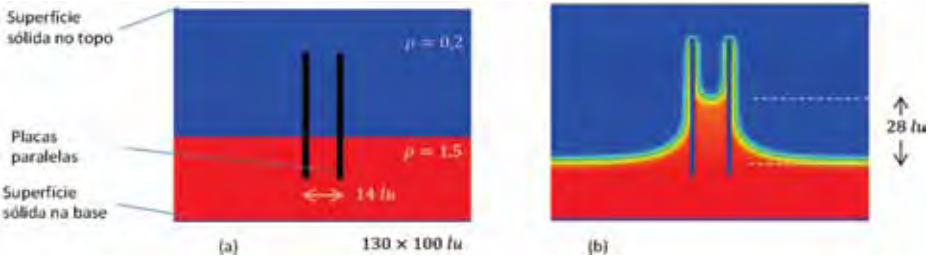


Figura 13. Geometria e resultados de uma simulação do fenômeno de ascensão capilar (DURAND *et al.*, 2011).

Valores analíticos para a ascensão capilar podem ser obtidos em função da tensão superficial σ e o raio de curvatura r da interfase com o uso da Equação (18). A tensão superficial está relacionada com o gradiente de pressão ΔP (diferença de pressão nas duas fases) por meio da equação de Young-Laplace, Equação (19), sendo θ o ângulo de contato. Por sua vez, ΔP, nas análises numéricas, está relacionado à densidade por meio da equação de estado.

$$h = \frac{\sigma}{r\rho g} \tag{18}$$

$$\Delta P = \frac{\sigma}{r} cos\ \theta \tag{19}$$

Os valores de ascensão capilar obtidos analiticamente são relativamente inferiores aos obtidos numericamente, 23,6 *lu* e 28 *lu* respectivamente na simulação da Figura 13. Uma das razões pode ser atribuída à imprecisão do cálculo da tensão capilar σ na simulação. Outra razão é a variação vertical da densidade detectada ao longo do líquido, o que representa um grau de compressibilidade nessa fase. Contudo, o fenômeno físico foi reproduzido qualitativamente. De acordo com Sukop e Thorne (2007), melhores modelos multifásicos são necessários para representar o fenômeno de ascensão capilar com maior precisão.

4.5.2 Aplicação ao fenômeno de infiltração

A simulação da infiltração pelo MLB pode ser realizada a partir de análises multifásicas utilizando o modelo de Shan e Chen (1993). Resultados de simulações do processo de infiltração apresentam concordância qualitativa com resultados experimentais, além de mostrar a capacidade do MLB de simular fluxo em geometrias complexas. Durand *et al.* (2011) realizaram um conjunto de análises de infiltração para diferentes condições de umidade e índice de vazios do meio poroso. A Figura 14 mostra um exemplo das geometrias utilizadas pelos autores onde o raio e a distância entre círculos, constituídos por grupos de nós sólidos, foram variados de modo a representar diferentes índices de vazios. Além disso, os nós da parte inferior do domínio foram definidos como sólidos, representando uma camada impermeável. Condições de contorno periódicas foram aplicadas no lado esquerdo e direito do domínio, de modo a simular um domínio com largura infinita.

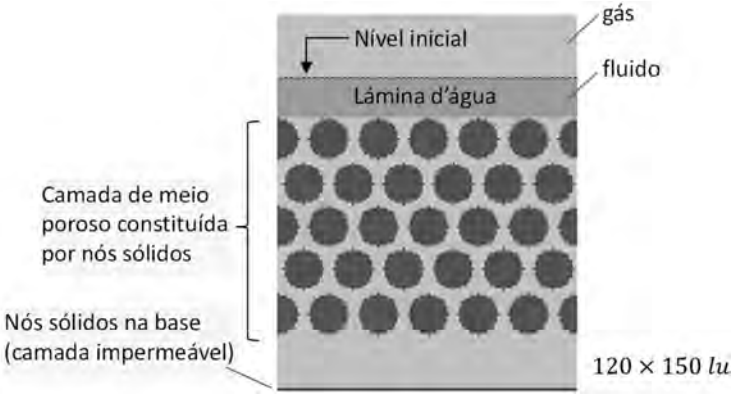


Figura 14. Geometria característica utilizada nas análises de infiltração.

Para representar um determinado grau de saturação inicial, partículas da fase líquida foram dispostas aleatoriamente nos interstícios da camada porosa até atingir o valor de saturação esperado. Numa primeira etapa da análise, é necessário esperar que as partículas líquidas se agrupem formando gotículas que se aderem às superfícies sólidas. Numa segunda etapa, uma lâmina de fluido é disposta na parte superior da camada porosa e, em seguida, é aplicada a força da gravidade com o fim de promover a infiltração.

A Figura 15 mostra uma das simulações de infiltração para um índice de vazios e=1,25 e grau de saturação S=30%. O instante t_0 representa o início do processo de infiltração. Nesse estágio, as partículas de água intersticial já se aderiram às superfícies sólidas, permitindo a formação de meniscos. Nos estágios posteriores, pode-se observar o escoamento gradual do líquido ao longo da camada porosa até ser retido pela superfície impermeável na parte inferior do domínio.

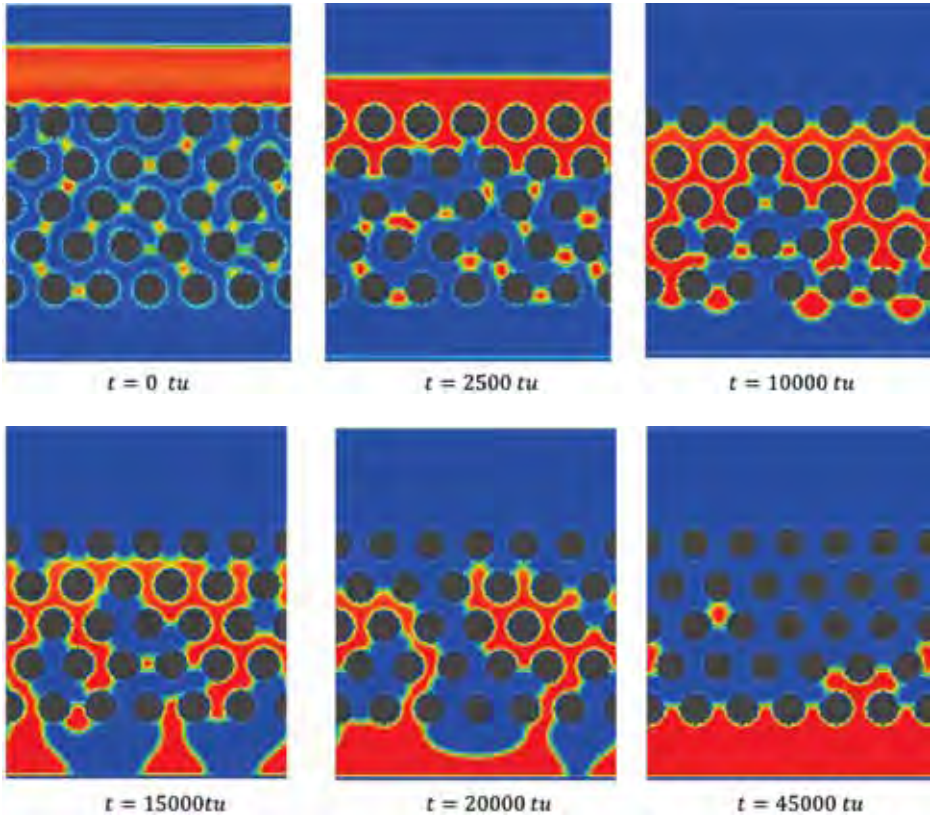


Figura 15. Processo de infiltração para e = 1,25 e S_{ini} = 30% e diferentes tempos.

A Tabela 2 mostra resultados de tempos e velocidades de infiltração de seis casos analisados para diferentes condições de índice de vazios e grau de saturação. Nos casos analisados, os autores destacam a observação de vários fenômenos, como a formação de gotículas, a formação de meniscos, a ascensão capilar e o fluxo promovido pela ação da pressão existente na fase gasosa.

Tabela 2. Tempos e velocidades de infiltração normalizadas para diferentes condições iniciais (DURAND *et al.*, 2011).

	e	S_{ini}	$t_{inf}(tu)$	$v_{inf}(\frac{lu}{tu})$
Caso 1	1,25	10%	5000	0,004
Caso 2	1,25	20%	6500	0,0031
Caso 3	1,25	30%	6900	0,0029
Caso 4	1,25	40%	8000	0,0025
Caso 5	0,72	50%	13000	0,0015
Caso 6	0,72	60%	17000	0,0012

A Figura 16 mostra a variação do tempo de infiltração com o grau de saturação para diferentes índices de vazios analisados. Qualitativamente, o aumento do tempo de infiltração com o grau de saturação está de acordo com resultados experimentais encontrados na literatura.

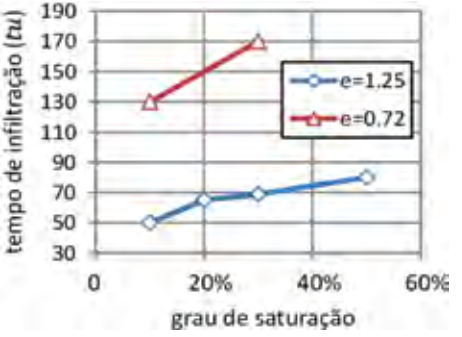


Figura 16. Variação do tempo de infiltração com o grau de saturação para diferentes índices de vazios.

Durand *et al.* (2011) relatam ainda um fato importante observado nas simulações, que é o efeito da pressão no ar ocluso nos interstícios. Esse efeito da pressão do ar foi capaz de movimentar meniscos e fazer fluir líquido localizado em regiões inferiores da camada porosa, mesmo na fase inicial da infiltração. Além disso, de acordo com a disposição de líquido intersticial, foi observada a eventual existência de fluxo vertical de forma semelhante ao princípio de vasos comunicantes. Esses efeitos locais frequentemente não são levados em conta em análises em macroescala.

4.6 Considerações finais

Em geral, o MLB é um método relativamente recente e promissor na simulação de fluidos, tanto líquidos quanto gases. Entretanto, várias técnicas estão em constante desenvolvimento de forma a melhorar a simulação de fluxo multifásico ou multicomponente. O principal desafio no momento é a interação desse método com outros métodos, como o Método dos Elementos Finitos (HASLAM *et al.*, 2008) e o Método dos Elementos Discretos (COOK *et al.*, 2004).

Entre os inconvenientes que o MLB apresenta, pode ser citada a necessidade de utilizar uma grelha regular. O fato de o MLB trabalhar com um sistema normalizado também dificulta a comparação com problemas reais. Muitos trabalhos que utilizam o MLB apenas apresentam resultados nesse espaço e, geralmente, expressam os resultados em termos qualitativos. Outro inconveniente é dado pela alta variabilidade da densidade em problemas multifásicos. Na abordagem de Shan e Chen (1993), somente se consideram forças de atração; as forças repulsivas que caracterizam um fluido quando é comprimido são desconsideradas. Como consequência, tem-se que a fase líquida torna-se compressível. Isso pode ser interessante em problemas onde o fluído está sujeito a altíssimas pressões, como no caso de reservatórios de petróleo, mas não deveria ser relevante em problemas sob condições normais de pressão. A formulação de He e Luo (1997) tenta reduzir consideravelmente o efeito da compressibilidade da fase líquida. Por outro lado, a simulação multifásica com elevada relação de densidade entre líquido e gás apresenta limitações devido à instabilidade numérica. Dessa forma, existem dificuldades em representar numericamente a mesma relação de densidade de fluidos reais, como, por exemplo, água e vapor. Inamuro *et al.* (2004) e Zheng *et al.* (2006) apresentaram diversas abordagens para as análises multifásicas com altas relações de densidade.

Dentro desse panorama, o presente capítulo objetivou despertar o leitor para novos caminhos no estudo da infiltração, em especial da água da chuva, bem como para a necessidade de constantes atualizações neste campo do conhecimento.

Agradecimento

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências bibliográficas

AREF, H.; BRØNS, M.; STREMLER, M. A. (2007). Bifurcation and instability problems in vortex wakes. Journal of Physics: Conference Series 64, 012015, 14 p.

BHATNAGAR, P. L.; GROSS, E. P.; KROOK, M. (1954). A model for collision processes in gases I: small amplitude processes in charged and neutral one-component systems. Physical Review, v. 94, p. 511-525.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. (2006). Infiltração da água no solo. 3. ed. Viçosa: UFV. 120 p.

BROWNE D.; DELETIC, A.; MUDD, G. M.; FLETCHER, T. D. (2008). A new saturated/unsaturated model for stormwater infiltration systems. Hydrological Processes, v. 22, p. 4838-4849.

BUICK, J. M.; GREATED, C.A. (2000). Gravity in a lattice Boltzmann model. Phys. Rev. E v. 61, n. 5, p. 5307-5320.

CHEN, H.; CHEN, S.; MATTHAEUS, W. H. (1992). Recovery of the Navier-Stokes equations using a lattice-gas Boltzmann method. Phys. Rev. A, v. 45, R5339-42.

CORRADINI, C.; MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; MELONE, F. (2004). Flood forecasting and infiltration modeling. Hydrological Sciences, v. 49, n. 2, p. 227-236.

COOK, B. K.; NOBLE, D. R.; WILLIAMS, J. R. (2004). A direct simulation method for particle-fluid systems. Engineering Computations, v. 21, n. 2-4, p.151-168.

DUCHENE, M.; MCBEAN, E. A.; THOMSON, N. R. (1994). Modeling of infiltration from trenches for storm-water control. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 120, n. 3, p. 276-293.

DURAND, R.; CARVALHO, J. C.; FARIAS, M. M. (2001). Análise numérica de infiltração em mesoescala. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA, 6, 7 a 9 abr. 2012, Brasília - DF. *Anais*… Brasília: Ipanema. p. 129-135.

FRISCH, U.; HASSLACHER, B.; POMEAU, Y. (1986). Lattice gas Automata for the Navier Stokes equation. Phys. Rev. Lett. v. 56, n. 14, p. 1505-1508.

GUO, Z.; ZHENG, C.; SHI, B. (2002). Discrete lattice effects on the forcing term in the lattice Boltzmann method. Phys. Rev. E, v. 65, n. 4, 046308.

HASLAM, I. W.; CROUCH, R. S.; SEAÏD, M. (2008). Coupled finite element - lattice Boltzmann analysis. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 197, n. 51-52, p. 4505-4511.

HE, X.; LUO, S. (1997). Lattice Boltzmann model for incompressible Navier-Stokes equation. Journal of Statistical Physics, v. 88, n 3, p. 927-944.

HE, X.; DOOLEN, G. D. (2002). Thermodynamic foundations of kinetic theory and lattice Boltzmann models for multiphase flows. Journal of Statistical Physics, v. 107, p. 309-328.

INAMURO, T; OGATA, T.; TAJIMA, S.; KONISHI, N. (2004). A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, J. Comput. Phys. v. 198, p. 628-644.

JONASSON, S. A. (1984). Dimensioning methods for storm water infiltration systems. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3, 4 a 8 jun. 1984, Göteborg. Chalmers University of Technology, p. 1037-1046.

JUCÁ, J.F.T. (1993). Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. 241 p.

LEEFLANG, M.; MONSTER, N.; VAN de VEN, F. (1998). Design graphs for stormwater infiltration facilities. Hydrological Sciences, v. 43, n. 2, p. 173-180.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. (1997). Permeability functions for unsaturated soils. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, v. 123, n. 12, p. 1118-1126.

MARTYS, N. S.; CHEN, H. (1996). Simulation of multicomponent fluids in complex three-dimensional geometries by the lattice Boltzmann method. Physical Review E, v. 53, p. 743-750.

MCNAMARA, G.; GARCIA, A.; ALDER, B. (1997). A hydrodynamically correct termal lattice Boltzmann model. Journal of statistical physics, v. 87, p. 1111-1121.

MCNAMARA, G. R.; ZANETTI, G. (1988). Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata. Phys Rev, v. 61, p. 2332-2335.

MENZEL, O.; SCHARFENBERG, R.; HESSE, D. (1998). Characterization of porous media by digital image processing. Chemical Engineering & Technology, v. 21, n.3, p. 248-253.

NABOVATI, A.; SOUSA, A. C. M. (2007). Fluid flow simulation in random porous media at pore level using the lattice Boltzmann method. J. Engineering Science & Technology, v. 2, n. 3, p. 226-237.

PERRIER, E.; BIRD, N; RIEU, M. (1999). Generalizing the fractal model of soil structure: The Pore-Solid Fractal approach. Geoderma, v. 88, p. 137-164.

PICO, C. E.; SANTOS, O. E.; PHILIPPI, P. C. (2005). Lattice-Boltzmann simulation of two--phase fluid flow through porous media. *In:* INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18, 6 a 11 nov. 2005, Ouro Preto. *Proceedings*… Ouro Preto: UFOP.

QIAN, Y. H. ; D'HUMIÈRES, D. ; LALLEMAND, P. (1992). Lattice BGK for Navier-Stokes equation. Europhysics Letters, v. 17, n. 6, p. 479-484.

RAISKINMAKI, P.; KOPONEN, A.; MERIKOSKI, J.; TIMONEN, J. (2000). Spreading dynamics of three-dimensional droplets by the lattice Boltzmann method. Journal of Computation Materials Science, v. 18, p. 7-12.

RAPPOLDT, C.; CRAWFORD, J. W. (1999). The distribution of anoxic volume in a fractal model of soil. Geoderma, v. 88, p. 329-347.

RICHARDS, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. Journal Physics, v. 1, p. 318-333.

ROTHMAN, D. H. (1988). Cellular-automaton fluids: A model for flow in porous media, Geophysics, v. 53, p. 509.

ROTHMAN, D. H.; ZALESKI, S. (1994). Lattice-gas models of phase separation: interfaces, phase transitions, and multiphase flow. Reviews of Modern Physics, v. 66, n. 4, p. 1417-1479.

SANTOS, L. O. E.; PICO, C. E.; DEGASPARI, H. C.; HAVERROTH, G. E.;PHILIPPI, P. C. (2005). Prediction of intrinsic permeabilities with lattice Boltzmann method. *In:* INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18, 6 a 11 nov. , Ouro Preto, MG. *Proceedings*… Ouro Preto: UFOP.

SHAN, X.; CHEN, H. (1993). Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components. Physical Review, v. 47 n. 3, p.1815-1817.

SUCCI S. (2001). The lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond. Oxford: Oxford University Press. 288 p.

SUKOP, M. C.; OR, D. (2003). Invasion percolation of single component, multiphase fluids with lattice Boltzmann models. Physica B, v. 338, p. 298-303.

SUKOP, M. C.; OR, D. (2004). Lattice Boltzmann method for modeling liquid-vapor interface configurations in porous media. Water Resources, 40:W01509.

SUKOP, M. C.;THORNE, D. T. J. (2007). Lattice Boltzmann modeling: an introduction for geoscientists and engineers. New York: Springer. 172 p.

URBONAS, B.; STAHRE, P. (1993). Stormwater best management practices and detention. Prentice Hall: New Jersey. 450 p.

VIGGEM, E. M. (2009). The lattice Boltzmann method with applicationsin acoustics. PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology. Norway.

WOLF, F. G.; PHILIPPI, P. C. (2003). Efeitos dinâmicos em processos de invasão de fluidos em meios porosos. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2, 15 a 18 jun. 2003, Rio de Janeiro. *Anais*… Rio de Janeiro: CENPES.

WOLF, F. G.; SANTOS, L. O. E.; PHILIPPI, P. C. (2008). Micro-hydrodynamics of immiscible displacement inside two-dimensional porous media. Microfluidics and Nanofluidics, v. 4, p. 307-319.

WU, K.; NUNAN, N.; CRAWFORD, J. W.; YOUNG, I. M.; RITZ, K., (2004). An efficient Markov chain model for the simulation of heterogeneous soil structure. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 68, n. 2, p. 346-351.

ZHENG, H. W.; SHU, C.; CHEW, Y. T. (2006). A lattice Boltzmann model for multiphase flows with large density ratio. Journal of Computational Physics, v. 208, p. 353-371.

ZIMMER, U.; GEIGER, F. W.; CAESPERLEIN, G. (1999). Safety factors for the design of infiltration facilities. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8, aug. 30 to sep. 3, 1999, Sydney. *Proceedings*… Sydney: The Institution of Engineers Australia, The International Association for Hydraulic Research, and The International Association on Water Quality. p. 256-264.

ZOU, Q.; HE, X. (1997). On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model. Physics of Fluids, v. 9, p. 1591-1598.

Capítulo 16

Uso de geossintéticos em estruturas de drenagem e infiltração

Maria das Graças Gardoni Almeida
Gregório Luís Silva Araújo
Ennio Marques Palmeira

1 Introdução

Geossintético, segundo definição dada pela norma ASTM 4439, é definido como sendo um produto planar fabricado com material polimérico utilizado em solo ou rocha ou outro material de engenharia geotécnica relacionado com uma parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema. Os materiais geossintéticos são utilizados nos mais diversos tipos de obra de engenharia geotécnica. Destacam-se as obras de proteção ambiental, confinamento, drenagem, filtração, reforço, separação e barreira. Sua utilização é cada vez maior, tendo em vista a escassez crescente de materiais naturais e do custo competitivo da utilização de soluções com geossintéticos.

A Figura 1 apresenta um exemplo de trincheira de infiltração de água da chuva. Em áreas urbanas, com a impermeabilização cada vez maior da superfície do terreno, torna-se importante facilitar a infiltração da água da chuva, com o objetivo de evitar áreas de alagamento e minimizar enchentes. As trincheiras drenantes são valas confeccionadas com material de alta permeabilidade para tal fim.

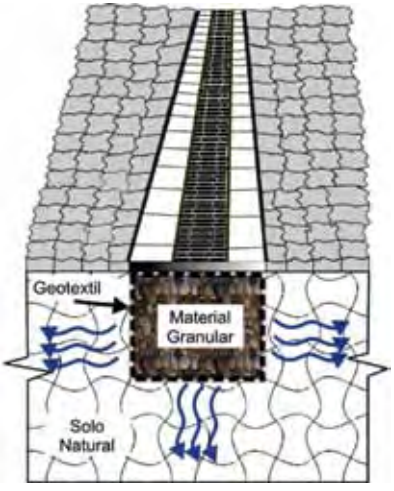
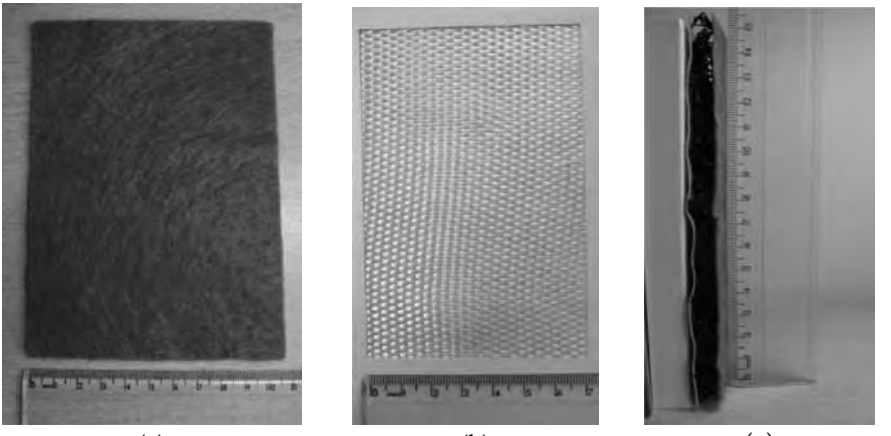


Figura 1. Trincheira de infiltração.

Para o caso das obras envolvendo infiltração de água, os elementos geossintéticos a serem utilizados são os geotêxteis e os geocompostos drenantes. Os primeiros são constituídos de fibras sintéticas, as quais podem ter, durante o processo de fabricação, direções aleatórias (geotêxteis não tecidos) ou direções preferenciais (geotêxteis tecidos). Os geocompostos drenantes são materiais leves e flexíveis que combinam um filtro geotêxtil com um núcleo drenante (georrede ou geoespaçador).

As dimensões do geocomposto drenante são função da vazão de água a ser drenada. As propriedades do geotêxtil a ser utilizado dependem do tipo e características do solo adjacente, das condições de fluxo, do tipo e das condições de utilização, conforme será descrito mais adiante. A Figura 2 apresenta exemplos de geotêxteis e de um geocomposto drenante.



(a) (b) (c)

Figura 2. Tipos de geotêxteis: (a) não tecido, (b) tecido e (c) geocomposto drenante.

2 Propriedades relevantes dos geossintéticos

2.1 Propriedades para as funções de filtração e drenagem

As funções desempenhadas pelos geossintéticos em uma obra de engenharia estão associadas às propriedades de engenharia específicas de cada obra e de cada aplicação (DNER, 1998; BUENO, 2010) que eles apresentam. Essas propriedades estas, por sua vez, têm dependência direta do processo de fabricação (modo de fabricação das fibras e dos filamentos, tipo de extrusão e estrutura do produto) e das propriedades dos polímeros componentes do produto. Para as obras em que ocorre a infiltração de água no solo, a função drenagem é a requerida. Entretanto, a eficácia e a perenidade dos sistemas de drenagem são asseguradas pela associação entre as funções filtrante e drenante. A função de filtração consiste em permitir que o fluxo de água percole livremente enquanto retém as partículas de solo, a fim de evitar tanto a contaminação da sessão drenante pelas partículas finas do solo circundante, quanto o aumento significativo da poro-pressão na vizinhança do dispositivo de drenagem, garantindo a sua estabilidade. A Figura 3 mostra um esquema representativo do princípio de funcionamento de um filtro sintético.

Os fatores que influenciam o comportamento dreno-filtrante de um geotêxtil são: a estrutura do geotêxtil, a estrutura do meio a filtrar (meio poroso ou partículas em suspensão) e as condições de solicitação impostas pela obra. A estrutura do geotêxtil influencia o comportamento filtração em função de sua espessura e do tipo e dimensão de seus poros. As condições de filtração em um meio poroso estão descritos a seguir.

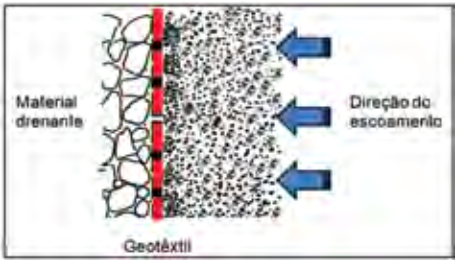


Figura 3. Princípio de funcionamento de filtro de geotêxtil.

Material a reter uniforme (FAURE, 2009): o comportamento em filtração está diretamente ligado à dimensão das partículas e à direção do fluxo. Se o fluxo ocorrer no sentido da aceleração da gravidade, o movimento das partículas em direção ao filtro faz com que elas formem um arco e estabilizem o sistema, desde que as aberturas superficiais do filtro não sejam maiores do que a sua abertura de filtração. Pode ocorrer uma perda inicial de partículas. A Figura 4 mostra a formação dos arcos.

Material a reter bem graduado (BHATIA, 2009): a eventual movimentação de partículas causada pelo fluxo pode formar um pré-filtro quando encontra o geotêxtil, pois a retenção de uma partícula maior faz com que esta partícula também contribua para bloquear uma partícula menor que chegue. Somente ocorre perda se a abertura de filtração do geotêxtil for muito superior à dimensão da partícula de solo (BHATIA, 2009). A Figura 5 mostra um esquema da formação do pré-filtro no solo.

Material a reter mal graduado não uniforme: aquele que apresenta curva granulométrica com coeficientes de não uniformidade ($C_U = D_{60}/D_{10}$) e de curvatura elevados podem apresentar "sufusão", ou seja, passagem livre das partículas mais finas através da estrutura do solo em função das condições de fluxo. Nesse caso, é preciso decidir entre reter ou deixar passar essas partículas. Se a perda de partículas pode desestabilizar o solo à montante do filtro, as partículas em movimento devem ser retidas. A retenção pode implicar uma redução da condutividade hidráulica na interface com o filtro.

Figura 4. Solos de granulometria contínua – formação de arcos e estabilização (Faure p.15, 2009).

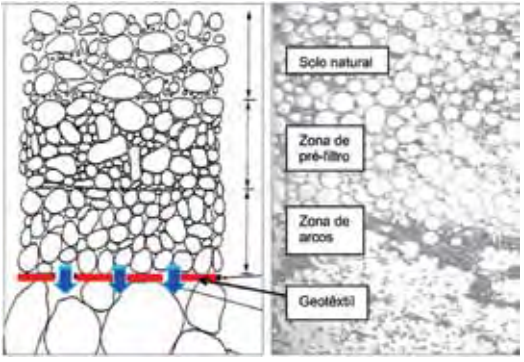


Figura 5. Solo bem graduado – formação do pré-filtro com a presença do geotêxtil (BHATIA p. 20, 2009).

Lafleur (1999) descreve três tipos de formas de curvas granulométricas, que estão representadas na Figura 6, para solos mal ou bem graduados, que geram situações de instabilidade.

- Retilínea – uma parcela substancial de tamanho de partículas é linear no meio da curva. A porcentagem de finos F está no intervalo 15% < F < 85%. Os solos que apresentam esse tipo de curva são denominados estáveis.
- Em patamar – solos amplamente graduados com porcentagem de finos F < 30% apresentam uma curva com um patamar. Nesse caso, as partículas finas se misturam na matriz de partículas mais grossas.
- Concavidade voltada para cima – solos com curva similar àquela do solo bem graduado, mas com sutil transição entre partículas grossas e finas.

A função de drenagem consiste em coletar e evacuar o fluxo através de um condutor para fora da obra. Os principais questionamentos em relação ao uso dos geotêxteis em sistemas de drenagem dizem respeito à colmatação a curto ou longo prazos dos filtros sintéticos, a capacidade de retenção do filtro, o efeito de elevados níveis de tensão nas características hidráulicas dos geotêxteis e a colmatação biológica (particularmente em sistemas de áreas de drenagem de disposição de resíduos). Por outro lado, o mecanismo de impregnação do geotêxtil por partículas de solo não tem sido considerado no desempenho dos sistemas sintéticos de drenagem. A impregnação da manta de geotêxtil pode ser causada durante o fluxo pela

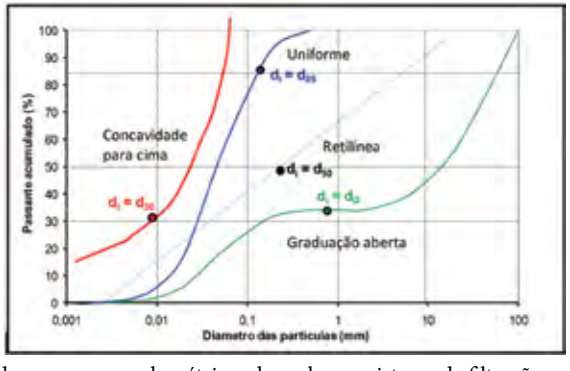
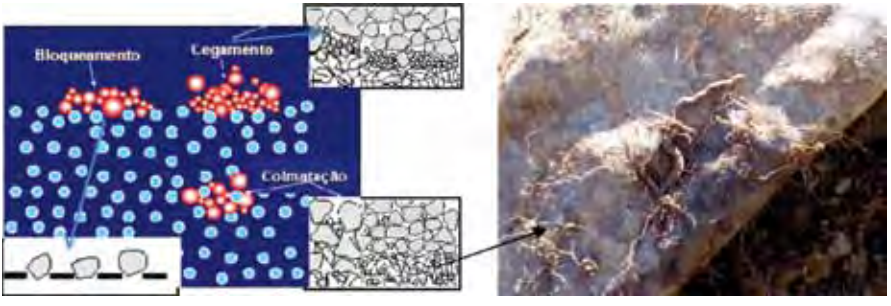


Figura 6. Formas das curvas granulométricas dos solos no sistema de filtração.

migração de partículas que ficam presas na estrutura de fibras, ou antes do início do fluxo, como consequência do lançamento e compactação do solo sobre a manta geotêxtil. Se o solo possui partículas muito pequenas ou se ele contém partículas muito finas, tamanho de areia fina e silte, as partículas podem introduzir-se na matriz fibrosa, afetando a compressibilidade, a filtração e o tempo de vida útil do sistema.

No caso dos filtros geotêxteis, o colapso do sistema pode ocorrer devido ao processo de colmatação que pode se apresentar sob diferentes aspectos: cegamento, bloqueamento ou colmatação interna, como apresentado esquematicamente na Figura 7 (PALMEIRA e GARDONI, 2000a). O cegamento pode ocorrer quando o geotêxtil está em contato com solos internamente instáveis. Esses solos estão sujeitos ao fenômeno da sufusão, que é o movimento de partículas finas retidas pela manta de geotêxtil. Tais partículas formam um filme de baixa permeabilidade, causando uma severa redução na vazão (Figura7a). Uma situação crítica de colmatação por cegamento é a filtração de partículas em suspensão. As partículas conduzidas pelo fluxo tendem a se depositar na superfície do geotêxtil, formando uma lâmina de partículas muito finas (VIDAL, 1999; JUNQUEIRA, 2000; COLMANETTI, 2000). O bloqueamento acontece quando as partículas do solo fecham os poros da matriz do geotêxtil. A colmatação interna pode ocorrer devido à retenção de um grande número de partículas do solo nos poros do geotêxtil ou como resultado da precipitação de substâncias químicas ou atividade biológica (Figura 7b). Christopher, Holtz e Fischer (1992) definem a colmatação como o resultado da penetração de partículas finas dentro do geotêxtil, as quais bloqueiam canais de poros ou fecham a superfície superior do geotêxtil, reduzindo sua permeabilidade.



(a) Processos de colmatação de geotêxteis (b) colmatação total do geotêxtil

Figura 7. Mecanismos de colmatação em filtros de geotêxteis (PALMEIRA e GARDONI, 2000a).

Nas aplicações de filtração e drenagem, os geotêxteis do tipo não-tecidos são os mais utilizados, apresentando como característica estrutural a distribuição aleatória dos fios ou fibras sintéticas. Tal estrutura é muito porosa (porosidades superiores a 90% sob condições não confinadas); as dimensões e geometrias dos poros são complexas e dependentes do nível de tensões a que o geotêxtil é submetido. Nessas condições, a avaliação do comportamento filtro-drenante desses materiais é também complexa e deve incorporar as influências de diferentes fatores, tais como: o nível de tensão normal imposto pela obra, a colmatação parcial da manta de geotêxtil pelas partículas de solo base durante o processo de instalação, pela compactação e pelo espalhamento do solo ou pelo fluxo durante a vida útil da obra. Portanto, para o adequado dimensionamento do material geossintético para as obras de infiltração, é necessário considerar as propriedades relevantes para as duas funções que ele exercerá: a de filtração e a

de drenagem. Para o desempenho das funções de filtração e drenagem, são requeridas para os geossintéticos, além das características necessárias à sobrevivência na instalação e durabilidade, propriedades físicas e hidráulicas satisfatórias.

2.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas são aquelas relacionadas às características de fabricação do produto, como a espessura(NBR 12569/92), a gramatura (NBR 12568/2000) e a porosidade(DIN 53855).

2.2.1 Gramatura (M_A)

A gramatura é definida como a massa de geotêxtil por metro quadrado de manta (g/m^2). É normatizada pela ABNT (NBR 12569/92 e ISO 9864/88). O valor da gramatura do produto é a média de dez determinações efetuadas no ensaio. Existe uma relação entre a gramatura e a resistência à tração da manta sintética. De forma geral, quanto maior a massa, maior a espessura e maior a resistência à tração de um geotêxtil. Os geotêxteis já foram separados, anteriormente, em classes em função da gramatura. Atualmente, são classificados em função da sua propriedade mecânica de resistência à tração.

O manual da ABINT (2004) adverte que a gramatura é uma propriedade que não fornece indicações de como o produto é fabricado, ou seja, qual o tipo de fibras (fibras curtas ou filamentos contínuos), como o entrelaçamento dos fios é feito (agulhamento ou não), entre outros aspectos. Portanto, ela não deve ser utilizada isoladamente como propriedade de especificação. Segundo o mesmo manual, os valores típicos de gramatura variam entre 100 e 900 g/cm^2.

2.2.2 Espessura (t_{GT})

A espessura nominal dos geotêxteis não tecidos é aquela obtida quando são submetidos a uma pressão confinante de 2 kPa, aplicada numa área de 2500 mm^2, por duas placas rígidas paralelas (ISO 9863/88, NBR 12569/92). A pressão é normatizada, pois a espessura é função do confinamento a que o geotêxtil está submetido.

2.2.3 Porosidade (n_{GT})

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total do geotêxtil e pode ser determinada em função da sua gramatura e da sua espessura, da densidade da fibra e/ou do filamento (ρ_f) e da massa específica da água a 4 °C (γ_a) pela seguinte expressão:

$$n_{GT} = \frac{1 - M_A}{(t_{GT} \cdot \rho_f \cdot \gamma_a)} \quad (1)$$

em que:
n_{GT} : porosidade (%);
M_A: gramatura (g/m^2);
t_{GT} : espessura (mm);
ρ_f: densidade da fibra;
γ_a: massa específica da água à 4ºC (g/cm^3).

Os geotêxteis não-tecidos apresentam porosidades elevadas sob condições não confinadas, da ordem de 90 a 93%.

2.3 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas relevantes são a permeabilidade normal à manta (k_n), a permeabilidade no plano da manta (k_p) e a abertura de filtração (FOS ou AOS). Tendo em vista que os geotêxteis são materiais muito compressíveis e que a espessura varia com a tensão de confinamento imposta pela obra, torna-se mais prático trabalhar com os conceitos de permissividade (ψ) e transmissividade (θ).

2.3.1 Permissividade (ψ)

A permissividade (ASTM D 4491/89 e NBR Proj 02:153.19-008) é definida como a relação entre a permeabilidade normal e a espessura, permitindo avaliar a facilidade com que o fluido passa através do geotêxtil. É expressa por:

$$\psi = \frac{k_n}{t} \tag{2}$$

em que:
ψ: Permissividade (s^{-1});
k_n: Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil (cm/s);
t: Espessura sob uma determinada pressão confinante (cm).

2.3.2 Transmissividade (θ)

A transmissividade (ASTM D 4716/87 e NBR Proj 02:153.19-014) é definida como a permeabilidade no plano da manta sintética multiplicada pela sua espessura. Ela permite avaliar a capacidade de descarga do geossintético quando ele exerce a função de drenagem do fluido (georredes, geoespaçadores, geotêxteis não tecidos agulhados, etc.), conduzindo-o para fora da estrutura. A transmissividade é expressa por:

$$\theta = k_p \cdot t \tag{3}$$

em que:
θ : Transmissividade (cm^2/s);
k_p: Coeficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil (cm/s);
t: Espessura sob uma determinada pressão confinante (cm).

Para os geocompostos, a gramatura do geotêxtil de cobertura não tem influência significativa no comportamento hidráulico quanto à transmissividade, pois o escoamento da água depende muito mais da forma espacial do núcleo do geocomposto (canais, conchas de ovos, etc.) do que do geotêxtil de cobertura.

2.3.3 Abertura de filtração (O_f)

A abertura de filtração do geotêxtil (ASTM D 4751/87 e NBR Proj 02:153.19-021) é definida como a abertura equivalente ao diâmetro da maior partícula que passa através de seus poros. Do ponto de vista prático, a abertura de filtração de um geotêxtil é o parâmetro mais importante em dimensionamento de filtros de geotêxteis (associada às dimensões dos poros e constrições no geotêxtil). A constrição é o tamanho da menor abertura em um canal de fluxo que atravessa um geotêxtil. A dimensão da constrição é que, de fato, determina o tamanho da maior partícula capaz de atravessar o filtro geotêxtil. Portanto, uma clara distinção pode ser feita entre poros e constrições: um poro é um espaço volumétrico formado entre quatro ou mais elementos (partículas, no caso de filtros granulares, e filamentos ou fibras, no caso de geotêxteis), ao passo que a constrição é uma abertura conectando dois poros (GIROUD, 1996). A Figura 8 mostra um esquema representativo de uma constrição.

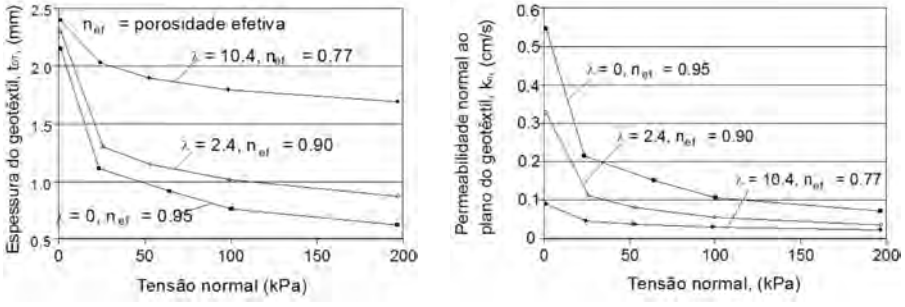
Figura 8. Representação do conceito de constrição da matriz de geotêxtil não tecido.

A determinação da abertura de filtração pode ser feita por meio de métodos experimentais diretos (peneiramentos seco, úmido e hidrodinâmico) e indiretos (intrusão de mercúrio, *bubble point* e análise de imagens), métodos teóricos (modelos matemáticos) e métodos semiempíricos. Um grande número de métodos tem sido desenvolvido para medir o tamanho de abertura de filtração do geotêxtil. Eles podem ser divididos em: métodos experimentais, métodos teóricos (modelos matemáticos) e métodos semiempíricos. Os métodos experimentais são classificados, segundo Giroud (1996), como:

- métodos que consistem em peneiramento de partículas de areia calibradas ou esferas de vidro através do espécime de geotêxtil, podendo ser caracterizados por: peneiramento seco (CALHOUN, 1972; GERRY e RAYMOND, 1983), peneiramento úmido e peneiramento hidrodinâmico (FAYOUX E EVON, 1982; MLYNAREK *et al.*, 1993).
- métodos baseados no fenômeno da capilaridade: intrusão de mercúrio (PRAPAHAN *et al.*, 1989) e *bubble point* (BHATIA *et al.*, 1994; FISHER, 1994; BHATIA e SMITH, 1995; VERMEERSCH e MLYNAREK, 1996; PALMEIRA e GARDONI, 2000).
- métodos baseados na análise morfológica (análise de imagens) de seções transversais de geotêxteis, onde os poros são preenchidos com resina (ROLLIN *et al.*, 1977) por meio do uso de um tratamento matemático para derivar a distribuição de tamanho de poros a partir de medidas feitas na seção.

2.4 Efeito das tensões e da pré-impregnação nas propriedades físicas e hidráulicas

Os geotêxteis são materiais muito compressíveis, em particular os geotêxteis não tecidos, que possuem uma estrutura porosa composta por um arranjo aleatório de fibras de pequenas espessuras. A redução da espessura dos geotêxteis, devido a tensões normais atuantes, causa a redução da sua permeabilidade. Por outro lado, a impregnação da manta de geotêxtil por partículas de solo durante a instalação na obra, ou mesmo durante o lançamento e a compactação do solo sobre ele, afeta a sua compressibilidade e permeabilidade. As Figuras 9 (a) e (b) mostram a variação da espessura e da permeabilidade de um geotêxtil não-tecido com as tensões normais. O geotêxtil foi submetido a diferentes níveis de impregnação, em laboratório (PALMEIRA e GARDONI, 2000b). Nessa figura, o nível de impregnação (λ) é definido como a razão entre a massa de partículas de solo presa dentro do geotêxtil por unidade de área e a massa de fibras de geotêxtil por unidade de área, e n_{ef} é a porosidade efetiva do geotêxtil. A Figura 10 apresenta os resultados de variação da vazão ao longo do plano de geocompostos submetidos a tensões normais de até 2000 kN/m².


Espessura do geotêxtil, t_{gt}, (mm)
n_{ef} = porosidade efetiva
λ = 10.4, n_{ef} = 0.77
λ = 2.4, n_{ef} = 0.90
λ = 0, n_{ef} = 0.95
Tensão normal (kPa)
Permeabilidade normal ao plano do geotêxtil, k_n, (cm/s)
λ = 0, n_{ef} = 0.95
λ = 2.4, n_{ef} = 0.90
λ = 10.4, n_{ef} = 0.77
Tensão normal, (kPa)

(a) Espessura x tensão normal (b) Coeficiente de permeabilidade x tensão normal

Figura 9. Efeitos da impregnação do geotêxtil por partículas de solo (PALMEIRA e GARDONI, 2000b).

Além de responder às funções estabelecidas em projeto, é preciso que os geossintéticos garantam a continuidade dessas funções no tempo, razão pela qual é importante a análise da durabilidade desses produtos. Em geral, produtos poliméricos apresentam grande durabilidade e, exatamente por esse fato, vêm sendo cada vez mais utilizados em obras de proteção ambiental onde, normalmente, são submetidos a solicitações químicas e biológicas importantes.

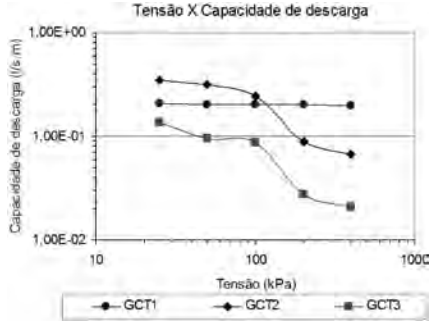


Figura 10. Efeitos da pressão nas propriedades hidráulicas de alguns geocompostos (SILVA, 2007).

2.5 Ensaios para determinação das propriedades dos geossintéticos

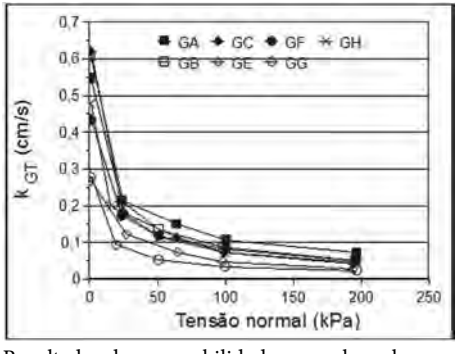
As propriedades físicas e hidráulicas dos geossintéticos são determinadas por meio de ensaios denominados ensaios de caracterização (ou ensaios índice) e ensaios de desempenho (ou de comportamento). Os ensaios de caracterização têm por objetivo determinar as características básicas do produto, sem levar em consideração a sua interação com o meio ambiente nem o processo de solicitação imposto na obra.

Os ensaios de comportamento são aqueles que permitem considerar as solicitações impostas pela obra: condições de instalação; modo, tempo e intensidade das solicitações; condições ambientes e interação com os meios adjacentes. A partir desses ensaios, estabelecem-se as propriedades funcionais de um geossintético e suas características de interação com os meios adjacentes.

2.5.1 Capacidade de fluxo normal ao plano

A condutividade hidráulica normal ao plano é normatizada pela ISO (AFNOR G 38016) e é geralmente muito elevada nos geotêxteis. O fluxo num corpo-de-prova isolado quase sempre será do tipo turbulento. Como essa não é a situação de campo na maior parte dos casos, a norma francesa propôs a utilização de múltiplas camadas para aumentar a perda de carga e trabalhar sob condições de fluxo laminar. Esse ensaio se mostrou muito eficiente para alguns geotêxteis não tecidos agulhados com gramatura acima das 200g/m^2, para os quais a superposição de camadas é válida. A Figura 11a mostra o equipamento usado nos ensaios para medida da permeabilidade normal ao plano do geotêxtil, e a Figura 11b apresenta os resultados obtidos em ensaios sob tensões normais de até 200 kPa.

(a) Equipamento para ensaios de permeabilidade normal ao plano



(b) Resultados de permeabilidade normal ao plano *versus* tensão normal

Figura 11. Determinação da capacidade de fluxo no plano do geotêxtil.

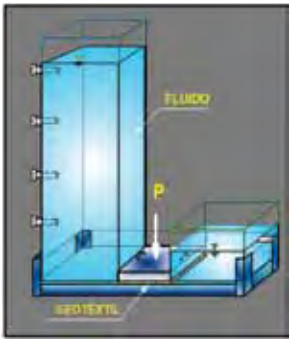
2.5.2 Capacidade de fluxo ao longo do plano

O ensaio para determinação da capacidade de fluxo ao longo do plano dos geossintéticos para função drenagem (georredes, geoespaçadores, geotêxteis não tecidos agulhados, etc.),

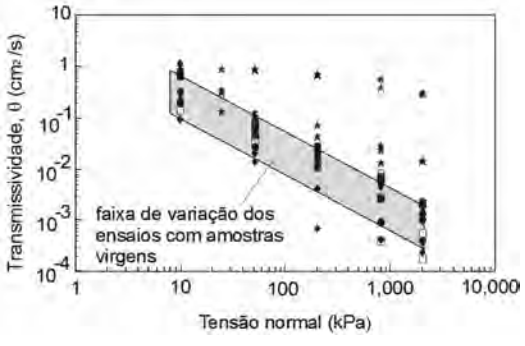
normatizado pela ISO (AFNOR G 38018) e com norma brasileira (ABNT) encaminhada para consulta pública, é esquematizado na Figura 12(a). Como a rigidez da superfície de contato intervém nos resultados, os ensaios de caracterização podem considerar superfícies específicas como concreto ou outro geossintético, ou uma superfície padrão para simular a penetração de solo, com características de compressibilidade estabelecidas em norma (ISO12958 1999).

No caso dos geotêxteis não tecidos, o efeito das tensões confinantes elevadas é mostrado por Gardoni *e* Palmeira (1998), que realizaram ensaios sob tensões de até 2000 kPa, verificando uma variação sensível da transmissividade até 200 kPa, conforme já observado por outros autores, com menorredução adicional da capacidade de descarga para tensões normais superiores a esse valor. A Figura 12(b) apresenta alguns resultados obtidos em ensaios.

Sob tensão normal e em condições de colmatação parcial, observa-se que a presença de partículas de solo reduz a compressibilidade do geotêxtil, influenciando também a permeabilidade no plano. Entretanto, por causa da redução na compressibilidade causada pela impregnação do solo, a transmissividade do geotêxtil pode ser pouco afetada pela presença do solo nos seus poros. As Figuras 12 a e b mostram resultados de ensaios de transmissividade sob uma ampla faixa de tensões normais efetuados em geotêxteis não tecidos submetidos a diferentes níveis de impregnação (GARDONI e PALMEIRA, 1999; PALMEIRA e GARDONI, 2000a). Os resultados mostram que a transmissividade de geotêxteis, particularmente os virgens, pode ser reduzida em duas a três ordens de magnitude para a faixa de tensões normais de 0 a 2000 kPa.



(a) Equipamento para ensaios de capacidade de carga ao longo do plano do geotêxtil



(b) Resultados de capacidade de carga ao longo do plano do geotêxtil

Figura 12. Determinação da capacidade de fluxo ao longo do plano da manta de geotêxtil sob tensões de compressão de 2000 kN/m² (GARDONI, 2000).

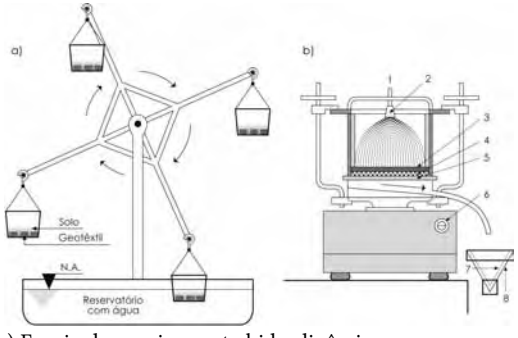
2.5.3 Abertura de filtração

A abertura de filtração de um geotêxtil é considerada igual ao diâmetro do maior grão de solo capaz de atravessar o geotêxtil. Os ensaios que utilizam a técnica de peneiramento são considerados como métodos diretos para determinação da abertura de filtração dos geotêxteis. Os tipos de peneiramento são: peneiramento seco, no qual se utilizam partículas de solo ou esferas de vidro para que passem através do geotêxtil; peneiramento úmido, que consiste

do peneiramento por vibração enquanto a água é jogada sobre as esferas ou partículas de solo, e peneiramento hidrodinâmico, em que as partículas de solo ou esferas de vidro são depositadas sobre o espécime de geotêxtil, contido em um recipiente, e o conjunto é submetido ao fluxo alternado de água pela imersão repetida dentro de um tanque com água.

Um ensaio do tipo peneiramento por via úmida, esquematizado na Figura 13(a) (VERTEMATTI, 2010), foi adotado pela ISO/EN em 1999 (ISO 12956). Até então existiam várias propostas de norma considerando situações de peneiramento a seco (ASTM D 4751/87), por via úmida ou hidrodinâmico (AFNOR G 38017/87). O esquema do equipamento para o ensaio hidrodinâmico é apresentado na Figura 13(b).

(a) Ensaio de peneiramento via úmida (ISO 12956)



(b) Ensaio de peneiramento hidrodinâmico AFNOR G 38017/87

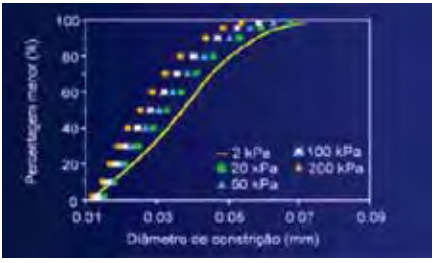
Figura 13. Equipamentos para ensaios de peneiramento via seca e hidrodinâmico (BHATIA, 2008).

A condição de carregamento normal ao plano da manta, sem tração no plano, leva geralmente a uma redução da abertura de filtração determinada sem carga normal. Ensaios realizados por Gourc e Faure (1990), entre outros, mostram uma pequena redução nos valores, com o aumento da tensão confinante. Palmeira e Fannin (1998) observam que, para geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos de poliéster, a redução da abertura de filtração é sensível até cerca de 25 kPa de tensão normal, variando pouco para tensões maiores.

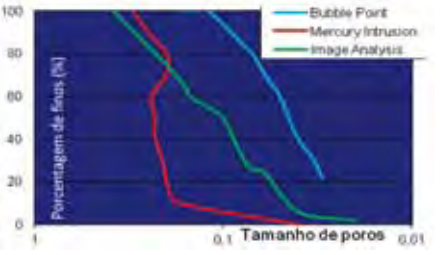
Os métodos de análise da distribuição de poros por medidas de tensão capilar fornecem informações de volume de poros e não de abertura de filtração, que é o fator relevante para a filtração. O método do *Bubble point* (BBP) combina medidas de tensão capilar com medidas de fluxo de ar através do espécime de geotêxtil. Vermeersh e Mlynarek (1996) e Gardoni e Palmeira (2000) mostraram que é possível obter medidas acuradas de tamanho de aberturas de filtração, mesmo sob tensão de compressão, com o método do *Bubble point*. Esse método combina medidas de tensão capilar com medidas de fluxo de ar através do espécime de geotêxtil. É baseado no princípio do fluxo capilar, no qual o material poroso somente permitirá a passagem do líquido quando a tensão aplicada exceder a atração capilar do líquido no maior poro.

O método da análise de imagens foi desenvolvido por Rollin *et al.* (1977). Os poros do geotêxtil são preenchidos por uma resina transparente, e a utilização de um analisador de imagens permite a visualização dos poros e a obtenção de medidas em seções transversais do geotêxtil. Um tratamento matemático é, então, usado para derivar a curva de distribuição de tamanho de poros.

Gardoni (2000) e Gardoni e Palmeira (2002) apresentaram resultados de ensaios de *BBP* e Análise de Imagens de geotêxteis virgens confinados sob tensões normais de até 1000 kPa. A Figura 14 mostra resultados de ensaios de BBP para um dos geotêxteis ensaiados (gramatura = 200 g/m^2). Pode-se notar, na Figura 14(a), que uma considerável redução dos tamanhos de poros ocorreu para tensões normais da ordem de 20 kPa, a qual é comumente encontrada em drenos. A Figura 14 (b) apresenta as comparações entre resultados obtidos pelos métodos de intrusão de mercúrio, BBP e análise de imagens (BHATIA *et al.*, 1994).



(a) Resultados dos ensaios de *Bubble point*



(b) Comparação entre três métodos de medida

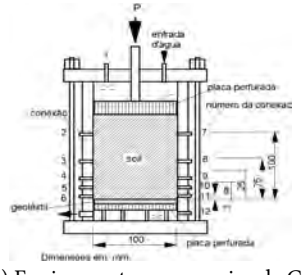
Figura 14. Distribuição de tamanho de constrição para diferentes níveis de tensões.

2.5.4 Ensaio de filtração do tipo razão entre gradiente

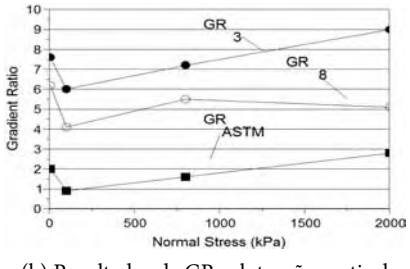
Uma forma usual de verificar a compatibilidade entre solo e geotêxtil e avaliar o potencial de colmatação do filtro do geotêxtil é a utilização de um ensaio denominado Razão entre Gradientes (*Gradient Ratio Tests*). O ensaio procura analisar a eficiência do filtro, verificando riscos de colmatação ou de perda excessiva de partículas (*piping*). O esquema do ensaio aparece na Figura 15a, e alguns resultados de ensaios em equipamento que permite a aplicação de tensões confinantes no sistema solo-filtro geotêxtil são apresentados na Figura 15b (GARDONI, 2000). A razão entre gradientes (GR), segundo a definição da ASTM D 4491 (ASTM, 1991), é dada por:

$$GR = \frac{i_{35}}{i_{12}} \tag{4}$$

em que: GR é a razão entre gradientes, i_{35} é o gradiente hidráulico no trecho de solo com 50 mm de altura (Figura 15), distante 25 mm da face do geotêxtil, e i_{12} é o gradiente hidráulico no trecho compreendendo os 25 mm inferiores da amostra de solo e o geotêxtil.



(a) Equipamento para ensaios de GR



(b) Resultados de GR sob tensão vertical

Figura 15. Ensaio de filtração do tipo Razão entre Gradientes (GR) (GARDONI, 2000).

3 Aspectos construtivos

3.1 Especificação

Uma especificação correta deve considerar todos os aspectos que envolvem a escolha e a instalação dos geossintéticos de modo que estes satisfaçam as condições de projeto. Após a identificação do interesse em utilizar um ou mais geossintéticos, um projeto geotécnico deve, na fase preliminar:

- analisar as condições de contorno e as solicitações;
- definir a função principal e as eventuais funções secundárias que cada geossintético irá desempenhar.

A partir da definição desses itens, pode-se escolher o método de dimensionamento mais apropriado e determinar as propriedades requeridas dos geossintéticos. Essas propriedades servirão de base para as especificações dos produtos a serem aplicados, devendo ser garantidas durante todo o período de solicitação (VIDAL *et al*., 1999).

O projeto básico deve especificar as propriedades requeridas e todas as condições de contorno e solicitações intervenientes. O projeto executivo deve especificar, além dos itens indicados no projeto básico, as características dos produtos escolhidos, as considerações para a escolha e as condições de recebimento, aceitação e armazenamento, bem como a metodologia construtiva a ser seguida.

3.1.1 Metodologia construtiva

Cada tipo de obra tem características específicas a serem observadas durante o processo construtivo. A especificação no projeto executivo deve indicar detalhes como: condições climáticas limítrofes; condição dos materiais adjacentes; direção de posicionamento das mantas, modo de sobreposição e emendas; tipo e modo de movimentação dos equipamentos.

3.2 Critérios de projeto

A prática corrente de projeto tanto para filtros granulares quanto de geotêxtil é baseada na experiência e em soluções empíricas (PALMEIRA e FANNIN, 2002). Mas, independentemente da prática empregada para o projeto, é necessário o conhecimento do regime hidráulico e das características do solo base. Em relação ao regime hidráulico, é importante determinar qual é a condição do fluxo: se permanente unidirecional, ou fluxo não permanente, que pode ser dinâmico, pulsante ou cíclico.

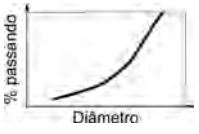
Para que a função de filtração seja assegurada, é necessário levar em conta certas características do solo com o qual o filtro estará em contato, tais como granulometria, coesão do solo, dispersividade (sensibilidade à erosão interna), densidade e permeabilidade (FAURE, 2009).

Com relação ao solo base, há solos internamente estáveis, e outros potencialmente instáveis internamente (KENNEY e LAU, 1985, LAFLEUR *et al.*, 1992 e 1989; MUNÕZ, 2005).

Os solos estáveis internamente possuem granulometrias uniformes ou são bem graduados e, durante o fluxo, não apresentam perdas significativas de partículas. Solos instáveis internamente apresentam granulometria com um patamar entre as frações finas e grossas ou curva com a concavidade voltada para cima (Tabela 2). São solos susceptíveis à migração interna de partículas finas (LAFLEUR, 1984; LAFLEUR *et al*., 1989 e LAFLEUR, 1999).

Uma situação problemática para projeto de filtros pode ocorrer em solos residuais, onde grandes partículas de solo, na verdade, podem ser formadas por grumos de partículas finas (PALMEIRA e GARDONI, 1998). Como os critérios de filtros são baseados nas dimensões de partículas de solo, a forma como as dimensões são obtidas é importante para a seleção do filtro de geotêxtil a ser usado no projeto.

Tabela 2. Algumas condições que podem sugerir comportamento internamente instável de um solo.

Condição	Observações	Referência
Solo descontínuo (com faixa granulométrica faltando)		Giroud (1982) e vários outros.
Curva granulométrica com concavidade voltada para cima		Lafleur(1999).
$C_c > 7$	$C_c = D^2_{30}/D_{60}D_{10}$	Bhatia e Huang (1995)
C_u elevado	$C_u = D_{60}/D_{10}$	Giroud (1982)
Se os 30% menores grãos do solo não atendem à condição $W_{4D} > 2{,}3\ W_D$		Kenney e Lau (1985)

Notas: C_c = coeficiente de curvatura do solo; C_u = coeficiente de uniformidade; D_{10}, D_{30} e D_{60} = diâmetros dos grãos correspondentes a 10, 30 e 60% passando; W_{4D} e W_D = percentagens em peso de grãos menores que os diâmetros D e 4D, respectivamente.

Os geossintéticos que exercem a função de filtros em uma obra de drenagem devem satisfazer aos critérios de retenção, permeabilidade, colmatação e sobrevivência à instalação, que são descritos a seguir.

3.2.1 Critério de retenção

O critério convencional de retenção compara a abertura de filtração característica do geossintético (O_{90}) com a dimensão representativa das partículas constituintes do esqueleto sólido do solo. Tal critério é baseado em:

$$FOS < x\ d_m \qquad (5)$$

em que: FOS é a abertura de filtração do geotêxtil; x é um fator semiempírico e d_m é o diâmetro da partícula a ser retida (m% das partículas têm diâmetro menor que d_m). Comumente se utiliza o valor de d_{85} do solo com base no critério de retenção; mas isso pode variar entre autores.

3.2.2 Critério de permeabilidade

Geralmente, o critério de permeabilidade é baseado em:

$$k_G > x\, k_s \quad (6)$$

em que: k_G é a condutividade hidráulica do geossintético; x é um número que depende das condições em que o filtro trabalhará, e k_s é a condutividade hidráulica do solo.

3.2.3 Critério de colmatação

Para que um filtro de geotêxtil possa reter satisfatoriamente um solo, algumas condições são requeridas (GIROUD, 1994):

- o solo deve estar em contato íntimo com o filtro de geotêxtil, não havendo espaço aberto entre o solo e o geotêxtil onde as partículas possam se mover ou acumular;
- o solo deve ter uma distribuição de tamanho de partículas contínua (solo bem graduado) e estar no estado denso, o que assegura uma interunião máxima entre as partículas de solo;
- as aberturas do filtro de geotêxtil devem ser apropriadas de forma a evitar a sua colmatação.

A expressão típica do critério anticolmatação tem a forma:

$$FOS \geq x\, d_{15} \quad (7)$$

em que: FOS é a abertura de filtração do geotêxtil; x é um fator semiempírico, e d_{15} é o diâmetro da partícula do solo de base correspondente a 15% passando.

No caso de situações mais complexas ou em solos internamente instáveis, recomenda-se a realização de ensaios de Razão entre Gradientes (*Gradient Ratio Test*). Valores elevados de GR podem indicar colmatação do filtro geotêxtil. Já valores muito baixos indicam a ocorrência de mecanismo de *piping*. Um valor de GR unitário indica que a presença do geotêxtil não afetou o regime de fluxo do sistema.

O critério anticolmatação proposto pela *Federal Highway Administration* (FHWA, 1991) estabelece que um determinado geotêxtil não deve ser utilizado caso o valor de GR seja maior que 3.

3.2.4 Critério de sobrevivência

O critério de sobrevivência à instalação está relacionado às solicitações mecânicas a que o geossintético estará submetido na obra. É normatizado pela NBR 15224/2005 (Tabela 3) e AASHO M288-96.

Tabela 3. Requisitos mecânicos mínimos (NBR 15224/2005).

Propriedades	Normas	Nível de solicitação I*		I**	
Alongamento sob carga máxima (%)	NBR 12824	<30	≥30	<30	≥30
Resistência à tração faixa larga (kN/m)	NBR 12824	20	8	30	12
Resistência à puncionamento	NBR 13359	3,5	1,5	5,0	2,5

Nível I: Trincheira pouco profunda (<=1m), terreno bem regularizado, agregado pouco contundente e compactação leve;
Nível II: adotado quando pelo menos uma das solicitações do nível I não se verificar.
Considerar a direção de menor resistência do produto.

4 Comentários finais

Os geossintéticos são materiais cada vez mais empregados em obras geotécnicas e de proteção ambiental em todo o mundo. A tendência é tal utilização aumentar aceleradamente no Brasil nos próximos anos. Nesse contexto, tais materiais podem ser muito úteis em obras que visem aumentar a infiltração de água no terreno, uma vez que aliam as viabilidades técnica e econômica, além de serem de fácil e rápida instalação. A presença de um filtro geotêxtil permite aumentar a vida útil do sistema, uma vez que tal filtro evitará a impregnação do material drenante por partículas de solo do terreno, além de propiciar melhor distribuição da água infiltrada no solo.

Como em qualquer obra de engenharia, a manutenção periódica do sistema de infiltração é fundamental. O ingresso de impurezas trazidas pela água de escoamento superficial pode vir a comprometer o filtro, colmatando-o. Assim, tal situação deve ser evitada ou minimizada, e inspeções periódicas para verificação do estado do filtro geotêxtil devem ser efetuadas.

Referências bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. M288. (1996). Geotextile specifications prepared by Joint Committee of AASHTO-AGC-ARTBA Task Force 25, Washington, DC, USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12592. (2000). Geossintéticos – Identificação para fornecimento. Rio de Janeiro: ABNT (projeto de revisão em consulta publica).

_____. NBR 12568. (2000). Geotêxteis – Determinação da gramatura. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. NBR 13359. (1996). Geotêxteis – Determinação da resistência ao pestático ensaio com punção CBR. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. NBR 12824. (1993). Geotêxteis – Determinação da resistência em tração não confinada em ensaio de faixa larga. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. NBR 12569. (1992). Geotêxteis – Determinação da espessura. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. NBR 12568. (1992). Geotêxteis – Determinação da gramatura. Rio de Janeiro: ABNT.

AMERICAN STANDART FOR TESTING MATERIALS. ASTM 4439-4. (2004). Standard terminology for geosynthetics. West Conshohocken: ASTM.

_____. ASTM D1987. (1995). Standard test method for biological clogging of geotextile or soil/geotextile filters. West Conshohocken: ASTM.

_____. ASTM D5101. (1995). Standard testing methods for measuring the soil-geotextile system clogging potencial by the gradient ratio. West Conshohocken: ASTM.

_____. ASTM D4355. (1992). Standard test method for deterioration of geotextiles from exposure to ultraviolet light and water (Xenon Arc Type Apparatus). West Conshohocken: ASTM.

_____. ASTM D4355. (1992). ASTM D 4491. (1989). Test methods for water permeability of geotextiles by permittivity. ASTM Standard on Geosynthetics. Philadelphia, USA: ASTM. p. 18-22.

BHATIA, S. (2008). Geosynthetics, properties and functions. *In*: SHORT COURSE IN GEO-AMERICAS, 2008, Cancun, Mexico.

BHATIA, S. K.; HUANG, Q. (1995). Geotextile filters for internally sable/unstable soils. Geosynthetics International, ICE Publishing, v. 2, n. 3, p.537-565.

BHATIA, S. K.; SMITH, J. L. (1995). Geotextile characterization and pore size distribution: Part II. A Review of Test Methods and Result. Geosynthetics International, ICE Publishing, v. 3, n. 2, p. 155-180.

BHATIA, S. K.; SMITH, J. L.;CHISTOPHER, B. R. (1994). Geotextile characterization and pore-size distribution: Part III. Comparison of Methods and Application to Design. Geosynthetics International, ICE Publishing , v. 3, n. 3, p. 301-328.

BUENO, B. S. (2010). Propriedades, especificações e ensaios. Notas de aula do curso de Pós-Graduação, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, SP.

CALHOUN, C. C. (1972). Development of design criteria and acceptance of specifications for plastic filter cloth. Technical Report S-72-7, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburgh, MS, USA. 83 p.

CFG NFP 84502-1. (1993). Géomembranes – Essais sur Joints – Partie 1 – Determination des Caractéristiques en Traction Cisaillement. Paris, França: AFNOR.

CFG NFP 84502-2. (1993). Géomembranes – Essais sur Joints – Partie 2 – Determination des Caractéristiques en Traction-Pelage. Paris, França: AFNOR.

COLMANETTI, J. P. (2000). Comportamento dreno-filtrante de geossintéticos submetidos ao fluxo de chorume. Brasília: UnB. 126 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM-076/00.

CHRISTOPHER, B. R., HOLTZ, R. D. AND FISCHER, G. R. (1992). Research needs in geotextile filter design. Proceedings of GeoFilters'92, Karlsruhe, Germany, pp. 19-26.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. DIN 53855. (1979). Testing of textiles; determination of thickness of textile fabrics; floor covering. Frankfurt, Alemanha.

FAURE, Y. H. (2009). Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration. Paris, França: Comité Français des Géosynthétiques, GT Filtration – Drainage.

FAYOUX, D.; EVON, E. (1982). Influence of the fibre size on the filtration characteristics of needled-punched geotextiles. *In:* 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, Proceedings… v. 1, Las Vegas, USA: p. 49-53.

FISCHER, G. R.; MARE, A. D.; AND HOLTZ, R. D. (1999). Influence of procedural variables on the gradient ratio test. Geotechnical Testing Journal, ASTM, v. 22, n. 1, p.22-31.

FISHER, G. R. (1994). The influence of fabric pore structure on the behavior of geotextile filters. PhD Thesis, University of Washington, USA, 500p.

GARDONI, M. G. A. (2000). Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão. Brasília: UnB. 313p. Tese de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.T.D-003A/2000.

GARDONI, M. G. A.; PALMEIRA, E. M. (1999). Transmissivity of geosynthetics under high normal stresses. In: Geosynthetics'99. Proceedings… Boston, Massachusetts, USA: p. 769-782.

GARDONI, M. G. A. & PALMEIRA, E. M. (1998). The performance of a geotextile filter in tropical soil. 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, pp. 1027-1032.

GERRY, B.S. & RAYMOND, G. P. (1983). Equivalent opening size of geotextiles. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ v. 6, n. 2, p. 53-63.

GIROUD, J. P. (1996). Granular filters and geotextile filters. *In*: GEOFILTERS'96. LAFLEUR, J.; ROLLIN, J. (Ed.). v. 1, Montréal, Canadá: Bitech Publishers. p. 565-680.

GOURC, J. P.; FAURE, Y. H. (1990). The soil, the water and the fibre: a fruitful interaction now controlled. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 4, May, Balkema. Proceedings… v. 3: Geomembranes and Related Products, The Hague. p. 949-972.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12956. (1999). Geotextiles and geotextiles related products – determination of the characteristic opening size. Switzerland, ISO.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11058. (1999). Geotextiles and geotextiles related products – determination of water permeability characteristics normal to the plane without load. Switzerland, ISO.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12958. (1999). Geotextiles and geotextiles related products – determination of water flow capacity in their plane. Switzerland, ISO.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9864. (1988). Geotextiles – Mass per unit area. Switzerland, ISO.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9863. (1996). Geotextiles and geotextiles related products – determination of thickness at specified pressures. Switzerland, ISO.

JUNQUEIRA, F. F. (2000). The behaviour of waste and drainage systems in waste cells under controlled conditions. Brasília: UnB. PhD Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasília, Brasília, Brazil.

KENNEY, T. C.; LAU, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, V..22, p. 215-225.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly cohesionless soils. Geotextiles & Geomembranes, V. 17, p. 299-312.

LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L. (1992). Filter criteria for well graded cohesionless soils. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FILTERS IN GEOTECHNICAL AND HYDRAULIC ENGINEERING, 1, GeoFilters'92. J. Brauns, U. Schuler and M. Heibaum (Eds). Proceedings…v. 1, Karlsruhe, Germany: International Geosynthtic Society: p. 97-106.

LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 115, n. 2, p. 1747-1768.

MLYNAREK, J.; LAFLEUR, J.; ROLLIN, A. L.; LOMBARD, G. (1993). Geotextile filter design based on filtration opening size obtained by hydrodynamic sieving. Filter in Geotechnical an Hydraulic Engineering. *In:* GEOFILTERS'92CONFERENCE, Karlsruhe, Germany. Brauns, J.; Heibaum; Shuler, U. (Eds.). Balkema: Rotterdam. p. 27-33.

MUÑOZ, C. S. (2005). Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. A. (2000a). Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges. *In:* INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOSYNTHETICS IN GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING; GEOENG2000, Proceedings… Melbourne, Australia. p. 85-110.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. A. (2000b). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *In:* GEOSYNTHETICS INTERNATIONAL. Special Issue on Liquid Collection Systems, v. 7, n. 3, pp. 403-431.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. A. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement Using Different Experimental Techniques. Geotextiles & Geomembranes, v. 20, p. 97-115.

PALMEIRA, E. M.; FANNIN, R. J. (1998). Abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob confinamento. *In: XI* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENG. GEOTÉCNICA – ABMS, Brasília, DF. Anais… Brasília, DF, ABMS. p. 1071-1078.

PRAPAHARAN, S.; HOTZ, R. D.; LUNA, J. D. (1989). Pore size distribution of nonwoven geotextiles. Geotechnical Testing Journal, v. 12, n. 4, p. 261-268.

ROLLIN, A. L.; DENNIS, R. (1987). Geosynthetic filtration in landfill design. *In:* GEOSYNTHETICS'87. Proceedings… v. 2, New Orleans, USA. International Geosynthetic Society, p. 456-470.

ROLLIN, A.; LOMBARD, G. (1988). Mechanisms affecting long-term filtration behavior of geotextiles. Geotextile & Geomembranes, v. 7, p. 119-145.

ROLLIN, A. L., MASOUNAVE, J. & DALLIRE, G. (1977). Study of the hydraulic properties of nonwoven fabrics. Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics Geotechnics, Paris, pp. 201-206.

SILVA. C. A. (2007). Ensaios de transmissibilidade em geocomposto para drenagem. Brasília: UnB. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM-157/97.

VERMEERSCH, O. G.; MLYNAREK, J. (1996). Determination of the pore size distribution of nonwoven geotextiles by a modified capillary flow porometry technique. *In:* BHATIA, S. S.; SUITS, L. D. (Eds.). Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites. Philadelphia, USA. American Society for Testing and Materials. ASTM STP 1281. p.19-34.

VERTEMATTI, J. C. (2010). Manual brasileiro de geossintéticos. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 418 p.

VIDAL, D.; FABRIN, T.; MONTEZ, F. T. (1999). O conceito de fatores de redução aplicados as propriedades dos geossintéticos. *In*: SIMPÓSIO SULAMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, 1, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Anais... v. 1, Rio de Janeiro, RJ. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – ABMS: p. 189-198.

Capítulo 17
Estruturas superficiais de infiltração: colchões drenantes

Cláudia Marcia Coutinho Gurjão
Mariana Ramos Chrusciak
Joseleide Pereira da Silva
José Camapum de Carvalho

1 Introdução

A expansão do ambiente urbano causa o aumento das superfícies impermeabilizadas, alterando o ciclo hidrológico nas cidades. Este capítulo busca apresentar resultados de pesquisas utilizando estruturas de infiltração, especificamente valas e colchão drenante, para o controle de fluxos superficiais na fonte, construídas com a finalidade de minimizar os impactos da impermeabilização nas cidades.

Com o aumento desordenado da população e o desconhecimento ou descaso em relação a técnicas para ocupação e uso apropriado do solo, observou-se um desequilíbrio ambiental em relação ao ciclo hidrológico, ocasionando enchentes e inundações localizadas. Por vezes, tais inundações e alagamentos são frutos da falta de infraestrutura urbana principalmente quanto à drenagem de águas pluviais; outras vezes, são consequência dos sistemas de drenagem convencionais que sobrecarregam talvegues e cursos d'água, gerando prejuízos socioambientais.

Com a urbanização, vem à impermeabilização da superfície do solo, e uma parcela da água que infiltrava passa a compor o volume de escoamento superficial, ocasionando o aumento dos volumes escoados e das vazões de pico, que provocam o crescimento na frequência e na magnitude das inundações que são, anualmente, noticiadas pelos principais jornais do país. A origem do problema está normalmente ligada à impermeabilização excessiva e à falta de planejamento e gestão ambiental. A responsabilidade, no entanto, deve, no estágio atual, ser dividida entre o Estado e a sociedade: o Estado por apresentar limitações no planejamento e na gestão, e a sociedade por não respeitar as normas urbanísticas estabelecidas, como o coeficiente de ocupação. Talvez o ideal seria que, em lugar de ser fixado o coeficiente de ocupação, fosse definido o coeficiente de preservação, fixando as condições em que esta deveria se dar.

No ciclo hidrológico, tem-se uma troca constante de água na hidrosfera, entre a atmosfera, a água do solo, águas superficiais, subterrâneas e das plantas. Se qualquer um dos processos internos for afetado, todo o ciclo hidrológico é prejudicado. O processo mais afetado com o crescimento desordenado é o escoamento superficial. A impermeabilização do solo e a remoção da vegetação nativa alteram as condições naturais de infiltração, ao diminuir o atrito da água com a superfície do solo, aumentando a velocidade de escoamento e ampliando

o volume de água a ser escoado superficialmente. As consequências disso são o aumento da frequência e magnitude das inundações e o surgimento e ampliação de erosões (Figura 1), gerando impactos econômicos e socioambientais.

(a) (b)

Figura 1. Rua localizada no Bairro São Francisco na cidade de Boa Vista, RR (a) e erosão junto à cidade de Ceilândia, DF (b) (2006).

Existem inúmeras técnicas que visam minimizar esses impactos das águas das chuvas. Alguns exemplos são reservatórios de controle de cheia em obras subterrâneas (túneis reservatórios), desimpermeabilização dos espaços urbanos públicos e privados, instalação de pequenos e médios reservatórios domésticos e industriais de acumulação, uso, infiltração e plantio de médios e pequenos bosques em ações de reflorestamento.

Todas essas técnicas passam pela necessidade de um ajuste cultural. Segundo Silva (2007), a alternativa do uso de obras de infiltração procura corrigir os processos hidrológicos alterados durante a urbanização (infiltração, intercepção, amortecimento), objetivando a reconstituição das condições de pré-ocupação. Essas estruturas, denominadas técnicas compensatórias, buscam ressarcir na fonte os volumes não infiltrados decorrentes dos efeitos da urbanização, ou seja, propiciam a infiltração antes que a água atinja a rede de drenagem convencional ou atue gerando processos erosivos no solo. As estruturas de infiltração, apesar de *a priori* apropriadas para os fins a que se destinam, devem, quando dos estudos e projetos, levar em conta riscos geotécnicos, como os oriundos de colapso estrutural e erosão interna do solo.

O uso sistemático dos dispositivos de infiltração como elemento de drenagem urbana no Brasil ainda é muito restrito, sendo difícil encontrar trabalhos publicados relatando essa utilização. Os trabalhos publicados em encontros científicos internacionais trazem exemplos de aplicação em regiões com características hidrológicas diferentes das encontradas no Brasil, principalmente no que se refere à precipitação e ao tipo de solo, o que significa que são necessários mais estudos para o emprego de tais tecnologias (SOUZA, 2002).

Este capítulo busca apresentar conceitos, aplicações, vantagens e desvantagens de estruturas de infiltração superficiais, bem como resultados de pesquisas recentes obtidos para um modelo físico experimental do tipo colchão drenante implantado no Campus da Universidade Federal de Roraima, na cidade de Boa Vista, objetivando avaliar o uso desta técnica

no controle de fluxos superficiais. Tal estrutura foi estudada com a finalidade de minimizar os impactos da impermeabilização em cidades, áreas industriais, rodovias e aeroportos em regiões onde o lençol freático é superficial.

2 Conceitos

Segundo Baptista *et al.* (2005), as técnicas compensatórias surgem para atuar na retenção e na infiltração das águas precipitadas, possibilitando ganhos na qualidade das águas pluviais. Os mesmos autores citam a classificação das técnicas compensatórias em: *não estruturais*, que atuam no retardamento do escoamento (revestimento de canais e pavimentos rugosos, controle na fonte, etc.), e *estruturais*, que permeiam as técnicas de retenção e infiltração e se diferem principalmente pela geometria e pela capacidade de captação do volume escoado (trincheiras, colchões drenantes, valetas, valas, poços de infiltração, etc.).

As águas de origem pluvial podem possuir carga poluente equivalente e, às vezes, até mesmo superior àquela presente nos esgotos sanitários. Ide e De Lucca (1985) e Chebbo (1992) relatam, ainda, que a carga de poluição nas águas pluviais é tão nociva quanto a dos esgotos domésticos, na mesma ordem de grandeza, não podendo ser desprezada quando se trata da qualidade do meio receptor (em geral os cursos d'água do meio urbano). A diferença crucial é que a poluição transportada pelas águas do escoamento pluvial é composta, essencialmente, por materiais em suspensão e metais pesados. Apesar da importância dessas referências, cabe salientar que a coleta cuidadosa da água da chuva pode torná-la quase que isenta de poluentes, exceto os presentes na atmosfera. Portanto, a captação e infiltração apropriadas deve ser entendida como uma opção viável e capaz de resolver vários problemas socioambientais, evitando, inclusive, a poluição dos mananciais que recebem indiscriminadamente os sistemas de drenagem das águas pluviais coletadas sem qualquer controle e que servem de suporte a publicações como as referidas aqui.

O conhecimento do funcionamento dos dispositivos ditos "alternativos" envolve pesquisas em um campo extremamente vasto e abrangente. São diversas as técnicas disponíveis, podendo-se citar: as bacias, os poços, as valas, os colchões drenantes, as trincheiras, os pavimentos drenantes e os reservatórios de retenção e detenção. Os sistemas podem ser únicos ou em separado e dotados ou não de tratamento.

Apesar da grande diversidade de alternativas, neste capítulo serão tratadas apenas as estruturas de infiltração consideradas superficiais, cuja profundidade é pequena em relação ao comprimento e/ou largura. Essas estruturas são geralmente utilizadas em áreas cujo lençol freático é superficial. Podem-se citar como estruturas superficiais as valas e os colchões drenantes.

2.1 Valas de infiltração

Valas, valos ou valetas são dispositivos de drenagem que atuam como técnicas compensatórias constituídas por simples depressões lineares escavadas no solo permeável, apresentando paredes inclinadas e geralmente não preenchidas. O seu objetivo é recolher águas plu-

viais de áreas adjacentes, concentrando o fluxo, efetuando o seu armazenamento temporário e criando condições para infiltração da água ao longo do seu comprimento. Elas permitem controlar as águas de escoamento superficial por meio de infiltração no solo ou redução da velocidade de escoamento. Elas podem ainda atuar como volume de acumulação até que a água se infiltre, isto é, seja paulatinamente drenada. Pode integrar-se paisagisticamente ao ambiente, tornando o espaço urbano mais agradável. Essas valas podem ainda ser preenchidas com agregado graúdo ou mesmo recobertas por grama (Figura 2).

Segundo recomendação de autores como Urbonas e Stahre (1993), as valas não devem ser utilizadas em locais onde a declividade longitudinal supere 2%, pois nessa condição a infiltração da água no solo não é favorecida. Cabe destacar que, em situações de maior declividade, faz-se necessária atenção de modo a evitar problemas como erosão, que dá origem à formação de ravinas e voçorocas.

Uma das grandes vantagens encontradas no dimensionamento das valas é que são mais superficiais e, portanto mais estáveis que as demais estruturas. O grande inconveniente do seu uso é que, dependendo de sua dimensão, elas ocupam uma grande área superficial, o que não é vantajoso em áreas densamente urbanizadas.

Foram verificadas duas metodologias para o dimensionamento das valas de infiltração: na primeira consideram-se as valas trabalhando secas (CIRIA, 1996), e na segunda consideram-se as valas trabalhando como canais, ou seja, com uma lâmina de água no seu interior (URBONAS e STAHRE, 1993).

Conforme Urbonas e Stahre (1993) e outros autores, para o dimensionamento das valas de infiltração são utilizados os parâmetros descritos a seguir.

- Declividade longitudinal: varia de acordo com a localização da vala no loteamento; no entanto, geralmente obedece ao limite de 2%.
- Coeficiente de rugosidade de *Manning* para o revestimento da vala: varia com o revestimento; para a grama, por exemplo, pode ser considerado o coeficiente de rugosidade de 0,45.
- Taxa de infiltração da água no solo saturado: deve ser determinada experimentalmente. A título de exemplo, o SCS (*Soil Conservation Service*) recomenda que se adote 6,35 mm/h para um solo do grupo C.
- Inclinação dos taludes da vala: deve ser compatível com a necessidade de infiltração, com a capacidade de infiltração do terreno e com a área disponível. É comum adotar-se seção V com 4H (H-horizontal):1V (V-vertical), obedecendo-se a uma largura máxima de 1,20 m de borda a borda no topo da vala.
- Chuva de projeto e respectiva duração: deve ser compatível com as características climáticas da região.
- Vazão de projeto: vazão drenada da área contribuinte para a vala de infiltração, determinada a partir do Método Racional.
- Profundidade do lençol freático no período chuvoso deve ser maior ou igual a 1,20 m, e a camada impermeável deve estar a no mínimo 1,20 m de profundidade. Essas características nem sempre são possíveis de serem obedecidas e, quando contrariadas, requerem maior controle da qualidade da água a ser infiltrada.
- A taxa de infiltração do solo quando saturado deve ser, segundo recomendações, superior a 7,60 mm/h.

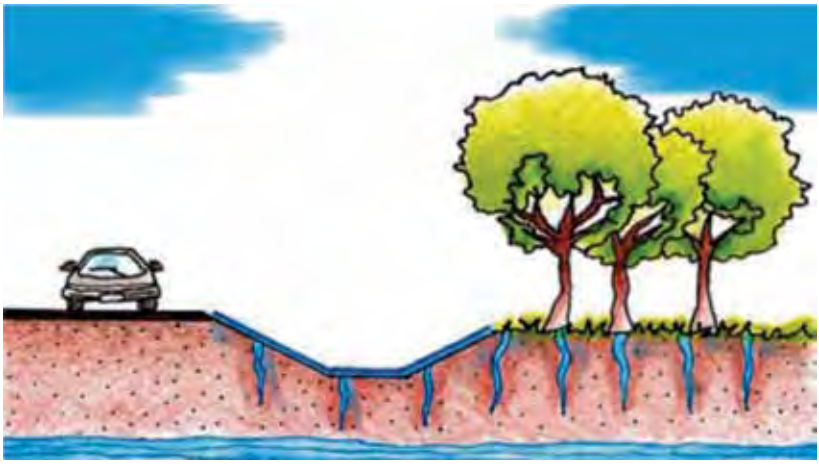


Figura 2. Ilustração de valas de infiltração (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2010).

2.2 Colchão drenante

Segundo o DER (Departamento de Estradas e Rodagens)-PR (2005), o colchão drenante é a camada executada com areia selecionada, aplicada diretamente sobre os terrenos de fundação de aterros compostos por materiais saturados e de baixa resistência ao cisalhamento, antecedendo a execução do aterro. Destaca-se, no entanto, ser frequente a utilização da técnica em cortes rodoviários para proteger o corpo estradal contra a ascensão do lençol freático – nesse caso, o material mais utilizado é a brita em sua constituição. Embora esses sejam os usos mais comuns, os colchões drenantes podem ainda ser utilizados como sistemas de acumulação e infiltração das águas pluviais em áreas urbanas, como parques. Para a composição paisagística, os colchões drenantes podem ser recobertos por materiais granulares, como o seixo rolado, ou por grama, requerendo neste caso cobertura de solo.

Os colchões drenantes apresentam-se com características funcionais semelhantes às das valas de infiltração. Podem, no entanto, ser citados dois aspectos que os diferenciam: 1) a vala é uma depressão com seção em V e ângulos inferiores a 90º em relação à horizontal, ao passo que o colchão drenante destaca-se por apresentar estrutura escavada com ângulos de 90º em relação à horizontal; 2) as valas são geralmente estruturas abertas, enquanto os colchões são preenchidos com materiais drenantes e filtros de proteção (Figura 3), podendo também apresentar-se sob lajes e com muretas de contenção.

Figura 3. Seção esquemática de colchão drenante.

O uso do colchão drenante se torna mais vantajoso em casos em que o lençol freático apresenta-se superficial, como é encontrado na região de Boa Vista – RR, onde se realizou a pesquisa que ilustrará este capítulo.

No caso dos colchões drenantes objetivando a infiltração, os cálculos podem ser efetuados de modo semelhante aos utilizados no projeto das valas de infiltração, devendo ser levadas em conta as condições relativas ao regime de precipitação, ao perfil geológico-geotécnico do solo e ao nível do lençol freático (GURJÃO, 2008).

3 Vantagens e desvantagens de um sistema de armazenamento e infiltração superficial

3.1 Vantagens

Os sistemas de armazenamento e infiltração superficial apresentam vantagens como:

a) permitem infiltração de parte da água para o subsolo;
b) possibilita retardo do deflúvio superficial direto;
c) esteticamente, pode ser trabalhada no contexto paisagístico, tornando o ambiente agradável;
d) permite o uso e a destinação de materiais descartáveis, como as garrafas PET, viabilizando a redução na utilização de agregados naturais.
e) permitem a implantação de estruturas de infiltração quando o lençol freático encontra-se próximo à superfície do terreno, requerendo, no entanto, cuidados especiais quanto à qualidade da água a ser infiltrada.

3.2 Desvantagens

Os sistemas de armazenamento e infiltração superficial apresentam desvantagens como:

a) oferecem limitação topográfica, devendo ser evitados planos com declividade maior que 0,1%;
b) requerem cuidados para se evitar o transporte de material sólido para a área de infiltração, o que proporcionaria a redução de sua capacidade de infiltração;
c) requerem concepção envolvendo materiais filtrantes de modo a evitar a deposição e colmatação do solo por meio do aporte de partículas finas carreadas em suspensão;
d) quando abertas, como é o caso das valas, o acúmulo de água durante o período chuvoso limita o trânsito sobre a área;
e) quando abertas, as áreas gramadas devem ser podadas ou cortadas periodicamente, o que implica custos de manutenção;
f) quando do uso de agregado graúdo, este pode devido ao peso, quando excessivo, compactar ou consolidar o fundo das estruturas de infiltração, reduzindo a capacidade de infiltração.

4 Pesquisa utilizando colchão drenante

A pesquisa foi realizada na cidade de Boa Vista, localizada na região norte do Brasil, no Estado de Roraima. Caracteriza-se por ser uma cidade plana, o que, por um lado, dificulta o processo convencional de drenagem e, por outro, requer estudo de técnicas alternativas, como é o caso do colchão drenante. A cidade, onde se concentra 80% da população, apresenta excessiva impermeabilização da superfície do solo, o que ocasiona maior fluxo superficial, frequente transbordamento e mesmo ruptura de canais quando estes são em diques, com consequentes alagamentos e grandes transtornos para a população (Figura 4).

4.1 Materiais utilizados na execução do colchão drenante

No caso desta pesquisa em Boa Vista-RR, em virtude do nível do lençol freático alto, aproximadamente a 0,50 m da superfície do terreno, optou-se pela implantação de colchão drenante como sistema de armazenamento e infiltração. O local de implantação situa-se no Campus da Universidade Federal de Roraima (UFRR), ao lado do Bloco III, onde funciona o curso de Engenharia Civil.

Convencionalmente, os colchões drenantes são preenchidos com agregados pétreos graúdos, de modo a possibilitar a drenagem e garantir certo armazenamento de água. O peso excessivo desses materiais, no entanto, geralmente termina por compactar ou consolidar o fundo das estruturas de infiltração, reduzindo a capacidade de infiltração de modo significativo, pois, no caso do colchão drenante, a maior área de infiltração localiza-se em sua base. Para resolver esse problema e maximizar os volumes do reservatório do colchão drenante, foram utilizadas garrafas PET (politereftalato de etila) no seu enchimento. O material destaca-se por sua leveza, e o seu uso contribui para a redução de problemas ambientais oriundos do seu lançamento indiscriminado no meio ambiente.

Figura 4. Rua alagada em um bairro na cidade de Boa Vista-RR, em 2006.

O colchão drenante foi dimensionado considerando-se a profundidade do lençol freático igual a 0,54 m determinada na sondagem SPT, a infiltrabilidade determinada a partir de ensaios de infiltração e as características do solo do local. Adotou-se para o modelo físico estudado profundidade de 0,50 m, largura igual a 2,00 m e comprimento igual a 3,00 m.

Foram utilizadas, ao total, 767 garrafas PET inteiras e fechadas com tampa. O uso das garrafas fechadas objetivou garantir sua maior capacidade de suporte, tendo em vista que a área utilizada não era isenta de circulação. Destaca-se, entretanto, que, ao se minimizar a circulação, devem ser utilizadas garrafas perfuradas e sem tampas, de modo a ampliar a capacidade de armazenamento do sistema. A implantação do sistema seguiu a seguinte sequência:

✓ Escavação e retirada de amostra deformada e indeformada (Figura 5);

Figura 5. Escavação do colchão drenante e retirada de amostras para ensaios de laboratório.

✓ Preparação dos materiais de enchimento (Figura 6)

(a) (b) (c)

Figura 6. Materiais utilizados no enchimento da célula: (a) Geotêxtil Bidim OP 20, (b) Areia grossa e (c) Garrafas PET inteiras.

✓ Construção e montagem da instrumentação (Figura 7);

Figura 7. Instrumentação utilizada: Piezômetro tipo Casagrande e Tassômetro.

✓ Montagem do colchão drenante, na seguinte sequência (Figuras 8 a 12):

1. Colocação da manta de geotêxtil (Figura 8);

Figura 8. Colocação da manta de geotêxtil.

2. Acomodação das garrafas PET (Figura 9);
3. Posicionamento da instrumentação (Figura 10);
4. Fechamento da manta de geotêxtil (envelopamento das garrafas PET) (Figura 11);
5. Colocação de 10 cm de areia grossa para o fechamento da vala (Figura 12).

Figura 9. Acomodação das Garrafas PET.

Figura 10. Posicionamento da instrumentação.

Figura 11. Envelopamento das garrafas PET.

Figura 12. Fechamento da célula com uma camada de 10 cm de areia.

5 Resultados dos ensaios de campo e laboratório

5.1 Ensaio de Infiltração

Foram realizados dois ensaios de infiltração em furo de sondagem, um até 0,50 m e outro até 0,80 m de profundidade (Tabela 1). Como de qualquer modo a infiltração não dispõe de camada de filtração, dada a proximidade no nível de água, a instalação dos colchões drenantes um pouco mais profundos favoreceria, no caso, a infiltração, pois, apesar de a diferença de carga em relação ao nível freático ser mantida, a permeabilidade do solo local aumenta com a profundidade, conforme indicado na Tabela 1. Por facilidade de execução, manteve-se, no entanto, a profundidade especificada de 0,50 m.

Tabela 1. Taxa de infiltração e permeabilidade.

Profundidade (m)	Taxa de infiltração (mm/h)	Permeabilidade de campo (cm/s)
0,5	11,7	$3{,}2 \times 10^{-4}$
0,8	45,0	$1{,}2 \times 10^{-3}$

5.2 Ensaio panda

Foram realizados cinco ensaios panda – dois utilizando a ponta com 2 cm² de área (Figura 13) e três utilizando a ponta com 4 cm² de área (Figura 14). Apesar de a área da ponta de 2 cm² ser ligeiramente superior à da haste de cravação, não é raro, devido ao fechamento do furo, ela oferecer certo atrito lateral, superestimando a resistência de ponta que se está a medir. Para os ensaios realizados, observa-se que os resultados obtidos para a ponta de 2 cm² tenderam a serem superiores aos da ponta de 4 cm² nos primeiros 40 cm do perfil de solo. Destaca-se, porém, que essa camada corresponde a um solo compacto contendo pedriscos, o que pode ter gerado a diferença de comportamento entre as duas pontas. A partir de 1 m de profundidade, os resultados foram muito semelhantes entre os dois tipos de ponta. Observa-se ainda dos resultados que a resistência tende a aumentar até 0,20 m a 0,25 m de profundidade, passando, então, a diminuir até 0,80 m a 1,00 m de profundidade. Aparentemente, esta seria a zona mais ativa quanto a variações sazonais do lençol freático.

5.3 Difratometria de raios X (DRX)

A análise foi realizada no Laboratório de Difração de raios X, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Foi utilizado o método do pó, e os resultados foram interpretados utilizando-se o *software* JADE 3.0, com banco de dados ICCD, (1996).

Tanto as propriedades físico-químicas dos solos finos como os comportamentos hidráulico e mecânico são largamente influenciados pelo tipo e pela quantidade de minerais presentes, particularmente aqueles que constituem a fração argila, também chamados de argilominerais. A determinação do tipo de argilomineral que constitui um solo é, portanto, fundamental para subsidiar as análises do comportamento e das propriedades físicas do solo.

Na Figura 15 estão apresentados os difratogramas resultantes das análises de DRX. O solo da UFRR apresentou como minerais principais quartzo seguido da caulinita. Os argilominerais formam agregados de tamanho predominante de areia, os quais, na maioria dos solos, são dispersos pela ação de defloculante e por meio do uso de ultrassom. Sobressai dessa figura, como esperado, que a amostra que passa na peneira 0,074 mm apresenta pico mais intenso de caulinita.

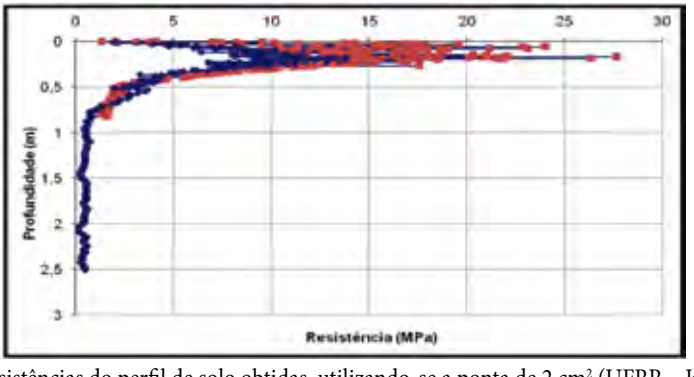


Figura 13. Resistências do perfil de solo obtidas, utilizando-se a ponta de 2 cm² (UFRR – Jan. 2008).

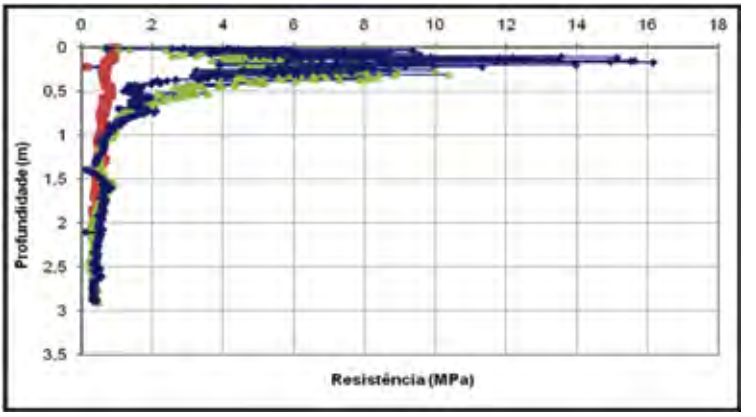


Figura 14. Resistências do perfil de solo obtidas, utilizando-se a ponta de 4 cm² (UFRR – Jan. 2008).

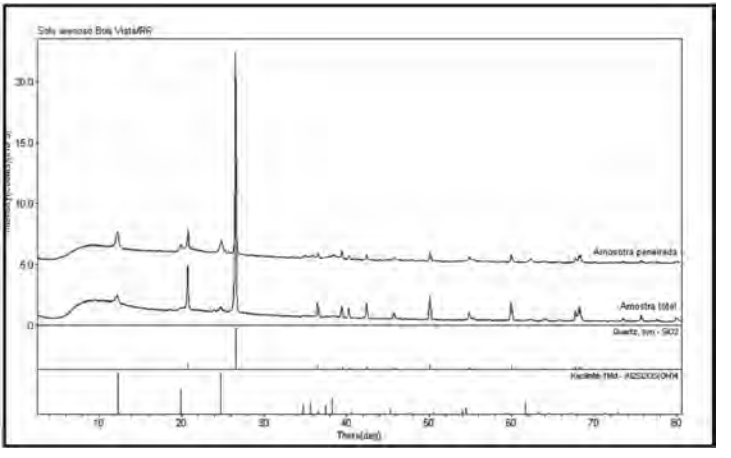


Figura 15. Difratograma de raios X – Solo da UFRR – Amostra peneirada e total.

5.4 Ensaios de caracterização física cilindros

A Tabela 2 reúne os resultados de umidade natural (w_o), umidade higroscópica (w_h), peso específico dos sólidos (γ_s), peso específico aparente seco natural (γ_d), índice de vazios (e) e porosidade (n) do solo estudado, obtidos para 0,5 m de profundidade. Considerando-se esses índices físicos, obtém-se um grau de saturação baixo (Sr = 35%) para o solo, indicando, dada a proximidade do lençol freático, pequeno potencial de ascensão capilar, o que reflete a natureza arenosa do solo confirmada pelo pequeno valor de umidade higroscópica.

Tabela 2. Caracterização física dos solos.

Amostra	w_n (%)	w_o (%)	(γ_s) (kN/m³)	(γ_d) (kN/m³)	e	n (%)
UFRR	7,5	1,00	25,8	16,57	0,557	36

A Tabela 3 apresenta os resultados de granulometria obtidos a partir de ensaios de sedimentação realizados sobre amostras coletadas a 0,50 m de profundidade com e sem o uso de defloculante. Na tabela, verifica-se que, com o uso do defloculante hexametafosfato de sódio, houve um aumento na quantidade de argila e uma proporcional redução no teor de areia, ou seja, as partículas de argila encontravam-se agregadas compondo a fração areia. O solo no estado natural pode ser classificado como uma areia pouco siltosa e, quando desagregado, como uma areia argilosa. O significativo grau de agregação da fração argila reflete o grau de intemperismo pelo qual passou o solo, uma vez que na mineralogia verificou-se a presença marcante apenas de quartzo e caulinita, sendo o quartzo um mineral resistente ao intemperismo e a caulinita um mineral fruto do intemperismo já profundo.

Tabela 3. Resultados das análises granulométricas.

Propriedades	Amostra 0,5 m	
Granulometria ABNT (%)	s/d	c/d
Argila (<0,005 mm)	3,1	27,1
Silte (0,05 – 0,005 mm)	7,7	6,2
Areia (2,0 – 0,05 mm)	89,2	66,7
Pedregulho (>2,0 mm)	0	0

Quanto à plasticidade, o solo foi caracterizado como não plástico. Segundo a classificação unificada, considerando-se os resultados dos ensaios de sedimentação sem o uso de defloculante, classifica-se como uma areia pouco siltosa; levando-se em conta os resultados com o uso de defloculante, como uma areia argilosa. Considerando os resultados da granulometria, para o solo sem defloculante, com o resultado do coeficiente de uniformidade, Cu, e o coeficiente de curvatura, Cc, trata-se, portanto, de um solo SP, areias e areia com pedregulho, mal graduados sem finos ou com pequenas quantidades.

5.5 Ensaios da classificação MCT

O solo para a profundidade de 0,5 m foi analisado segundo a metodologia expedita de classificação MCT. Quanto ao índice c', que traduz a argilosidade do solo, o resultado foi abaixo de 1,6, caracterizando-o, assim, como texturalmente arenoso. Concluiu-se, neste sistema de classificação, segundo os resultados obtidos, tratar-se de solo variando de LA (areia siltosa laterítica) a LA' (areia argilosa laterítica). Como a metodologia MCT utiliza solos sem o uso de agentes químicos desagregadores, se levada em conta a textura obtida nos ensaios de granulomentria sem o uso de defloculante, o solo pode ser classificado apenas como uma areia pouco siltosa laterítica (LA). Destaca-se, ainda, que a classificação como solo laterítico está em consonância com a mineralogia obtida, pois a caulinita é fruto do processo de intemperização.

5.6 Ensaio de permeabilidade

As permeabilidades foram obtidas a partir de ensaios de campo e de laboratório. Em laboratório usou-se o ensaio a carga variável realizados sobre amostra indeformada oriunda de bloco coletado com base assente a 0,50 m de profundidade. O resultado obtido (2,6 x 10^{-4} cm/s) foi muito similar ao obtido no campo (3,2 x 10^{-4} cm/s) por meio da técnica da infiltração em furo a trado realizado até 0,50 m de profundidade.

De acordo com Nogami e Villibor (1995), a permeabilidade dos solos, analisados neste trabalho, pode variar da seguinte forma: no solo LA, a permeabilidade varia de 10^{-3} a 10^{-7} cm/s e no LA` de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s. Logo, o solo da UFRR deve ser classificado, segundo a permeabilidade, como um solo LA, corroborando as análises anteriores.

5.7 Ensaio do furo de agulha (*pinhole test*)

A Figura 16 apresenta os resultados das vazões determinadas no ensaio de *pinhole test*. Para que se possa entender e explicar como devem ser analisados os resultados destes ensaios em solos tropicais não dispersivos, apresentam-se, na mesma figura, os resultados obtidos para um solo intemperizado de Brasília coletado a 1 m de profundidade (SILVA, 2007).

Na fase de carregamento hidráulico, verifica-se que para o solo de Brasília ocorre uma mudança de comportamento sob uma carga de 200 mm de coluna d'água, enquanto para Boa Vista essa mudança se dá à 200 mm de coluna d'água. Como ambos os solos são não dispersivos, essa mudança de comportamento não chega a ser preocupante. Nesses solos, o mais importante é se avaliar a diferença existente na curva entre as fases de carga e de descarga, pois quanto maior for a diferença maior a possibilidade de estar ocorrendo um processo de esqueletização do solo. Verifica-se que, enquanto para o solo de Brasília essa diferença é pequena, para o solo de Boa Vista ela praticamente inexiste, ou seja, não há para este solo riscos evidentes de erosão interna e de esqueletização do maciço.

Ainda comparando-se o solo de Brasília com o de Boa Vista, observa-se que, apesar de ser argiloso, o solo de Brasília apresenta maiores vazões que o de Boa Vista, que foi identificado como uma areia laterítica. Isso se dá, provavelmente, devido ao fato de o índice de vazios do solo de Brasília (e=1,6) ser quase três vezes superior ao obtido para o solo de Boa Vista.

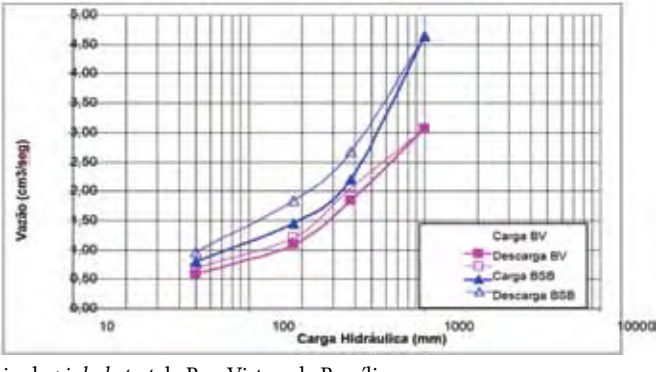


Figura 16. Ensaio de *pinhole test* de Boa Vista e de Brasília.

5.8 Sucção

Os solos localizados em região tropical caracterizam-se, geralmente, por espessos mantos na condição não saturada, o que torna mais complexos os estudos realizados para o entendimento do comportamento hidráulico e mecânico desses solos. Destaca-se, porém, que para o local de estudo o nível d'água era bastante superficial (0,54 m de profundidade). No entanto, para um melhor entendimento do comportamento do solo estudado, determinou-se sua curva característica de retenção de água.

As curvas características de retenção de água têm a forma atrelada ao tamanho e à distribuição dos poros, ou seja, ao arranjo estrutural. O potencial de retenção de água depende ainda da natureza mineralógica e superfície específica das partículas que compõem o solo. Para melhor entendimento dessa influência do tipo de solo na curva característica, apresentam-se, na Figura 17, os resultados obtidos para amostra coletada a 0,50 m de profundidade no local de estudo e para um solo tropical poroso oriundo do Distrito Federal, coletado a 1 m de profundidade. Em ambos os casos, a curva característica foi obtida pela técnica do papel filtro.

De acordo com Camapum de Carvalho e Leroueil (2000), em se tratando de solos tropicais, o intemperismo e a acidez são responsáveis pela agregação de partículas cimentadas ou não por óxidos e/ou hidróxidos de alumínio e/ou ferro. Essas agregações, por sua vez, ligam-se a outras, seja pelos cimentos ou por pontes de argila (PAIXÃO e CAMAPUM DE CARVALHO, 1994), dando origem à distribuição bimodal de poros. No interior dos agregados, estão os microporos e, em seu exterior, entre eles, os meso e macroporos.

Os solos com distribuição bimodal de poros apresentam dois pontos de entrada de ar na curva característica de retenção de água. O primeiro é referente à entrada de ar nos macroporos, para pequenos valores de sucção, e o segundo diz respeito à entrada de ar nos microporos, para valores de sucção mais elevados. Nos solos tropicais, os macroporos ocorrem interagregados, enquanto os microporos estão intra-agregados, estes muitas vezes podendo apresentar volume total maior que o dos macroporos (CARDOSO, 2002). Como se encontram distribuídos na matriz do agregado, os microporos, geralmente, interferem pouco nos comportamentos hidráulico e mecânico do solo, afetando de modo mais incisivo apenas a deformabilidade e a resistência dos próprios agregados.

Segundo Aubertin *et al.* (1998) *apud* Guimarães (2002), espera-se que o ponto de entrada de ar varie entre 0,2 kPa a 1 kPa em areias grossas, 1 kPa a 3,5 kPa em areias médias, 3,5 kPa a 7,5 kPa em areias finas, 7 kPa a 25 kPa em siltes e mais de 25 kPa para as argilas. Para as curvas apresentadas, verifica-se que, neste sistema de classificação, o solo de Boa Vista se enquadraria na categoria areia média, e o de Brasília, na categoria areia fina. No entanto, a intemperização gerando a agregação das partículas termina por criar uma condição de macroporosidade que desloca o solo neste sistema de classificação, pois, para os casos em tela, tem-se para o solo de Boa Vista uma areia fina argilosa e para o de Brasília uma argila arenosa (SILVA, 2007). Observa-se, no entanto, que a pressão de entrada de ar dos dois solos é muito semelhante, mostrando que os agregados são minerais de mesma natureza, minerais caulinítico s.

Considerando-se o teor de argila obtido com o uso de defloculante (27,1%) e o teor de umidade de 5% como correspondente a microporosidade dos agregados, é possível estimar o índice de vazios dos agregados. Obtém-se, assim, um valor estimado desse índice de vazios como igual a 0,476.

A curva característica obtida para o solo de Boa Vista indica ainda, pela verticalidade da curva entre os pontos de término de entrada de ar dos macroporos (w=12%) e o ponto de início da entrada de ar no microporos (w=5%), tratar-se de solo com pouca graduação de poros entre os macro e os microporos.

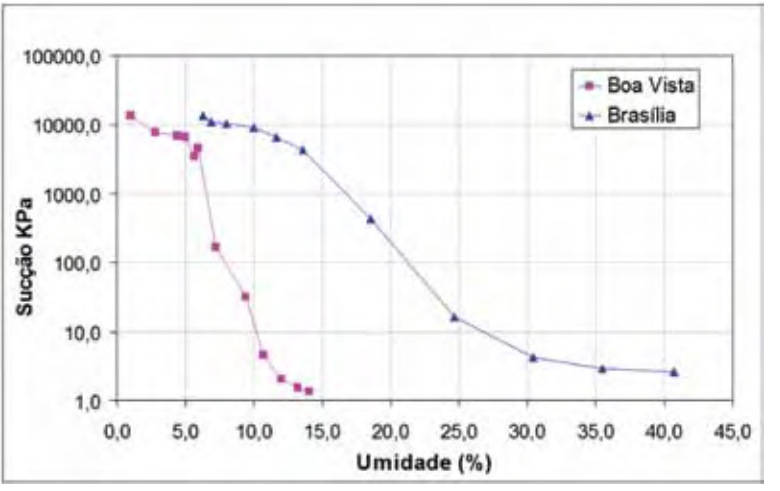


Figura 17. Curva característica umidade *versus* sucção do solo de Boa Vista, RR.

5.9 Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados a uma velocidade de 0,046 mm/min, utilizando-se corpos-de-prova com seção de base quadrada (6 cm x 6 cm) e 2,54 cm de altura no estado natural. A Tabela 4 apresenta os índices físicos dos corpos-de-prova ao final do ensaio. Observa-se desses resultados que apenas o corpo-de-prova submetido a 200 kPa de tensão confinante vertical sofreu significativa redução de porosidade ao longo do ensaio. Com isso, já é possível prever que o sistema de infiltração utilizado, garrafas PET com 10 cm de cobertura de areia, não é suscetível de gerar qualquer compactação adicional do solo suporte.

A Figura 18 mostra o resultado do ensaio de cisalhamento utilizando tensões normais de 50, 100 e 200 kPa e amostra na condição de umidade e porosidade natural.

A Figura 19 apresenta as envoltórias de ruptura do solo considerando-se a resistência de pico e a residual. Com base nesses resultados, obteve-se uma coesão de pico igual a 133 kPa e residual de 15,5 kPa e um ângulo de atrito de pico igual a 50º e residual igual a 47º. Apesar dos excelentes coeficientes de correlações obtidos na análise dos resultados, constata-se que o ângulo de atrito é elevado, mesmo em se tratando de um solo arenoso como consta das análises granulométricas. Constata-se também que a presença de coesão na resistência residual reflete que, mesmo após a ruptura de pico, a capilaridade continua atuando no solo. A diferença entre a coesão de pico e residual aponta para a presença de ligações cimentíceas no solo e/ou para o fato de que, na ruptura, a parcela de sucção devido à energia de adsorção deixa temporariamente de atuar.

Tabela 4. Índices físicos da amostra de solo.

Tensão normal (KPa)	Características do corpo-de-prova					
	W (%)	γ_n	γ_d	n (%)	e	Sr (%)
50	7,28	17,20	16,04	36,7	0,58	32,50
100	7,28	17,65	16,46	36,70	0,58	32,12
200	7,28	18,51	17,26	31,97	0,47	38,08
Tensão Normal (KPa)	Características do corpo-de-prova após consolidação					
	W (%)	γ_n	γ_d	n (%)	e	Sr (%)
50	6,79	17,46	16,35	35,48	0,55	32,03
100	6,69	18,24	17,10	32,45	0,48	35,99
200	6,88	19,59	18,33	27,54	0,38	46,68

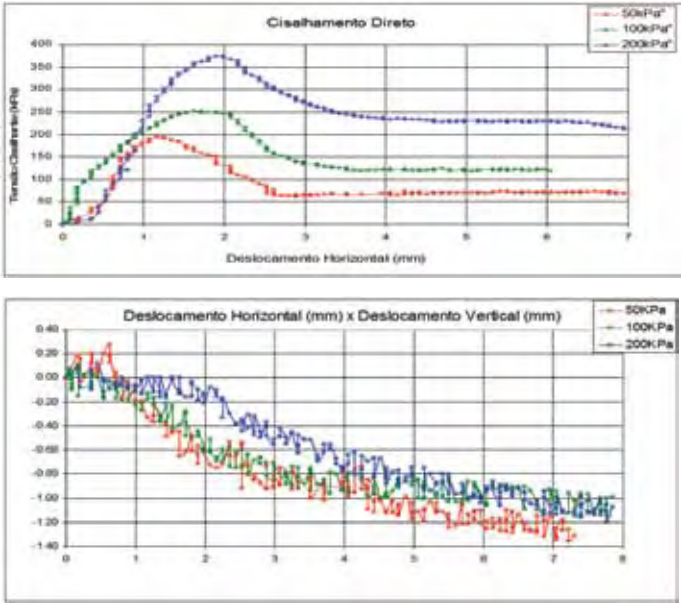


Figura 18. Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

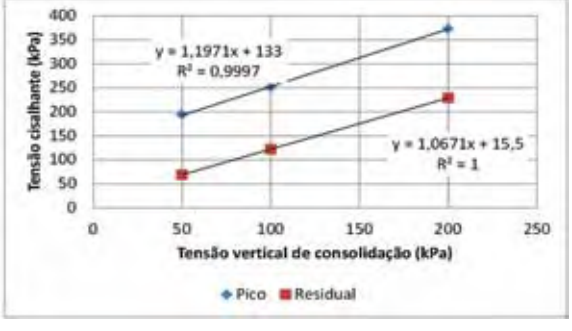


Figura 19. Envoltória de ruptura para o solo.

5.10 Ensaios de adensamento e análise de colapsibilidade

A realização dos ensaios oedométricos teve por objetivo principal analisar a colapsibilidade do solo por inundação. Cabe destacar que na área estudada, o nível d'água, embora no período chuvoso seja muito superficial (obteve-se 0,54 m), no período de seca pode sofrer significativo rebaixamento, o que torna importante o ensaio de colapso.

O potencial de colapso pode ser determinado a partir da Equação 1, utilizando-se os resultados de adensamento obtidos para a amostra no estado natural e após inundação (Figura 20). A título de exemplo, é apresentado na Tabela 5 o resultado calculado para uma tensão de inundação igual a 100 kPa.

$$CP = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (1)$$

em que:
CP = potencial de colapso;
Δe = variação do índice de vazios na inundação;
e_o = índice de vazios inicial (antes da inundação).

A Figura 20 mostra as curvas de adensamento obtidas para as amostras no estado natural e inundadas. Observa-se na figura que, mesmo para um pequeno valor de tensão normal aplicada (10 kPa), o solo, quando inundado, sofreu colapso. Isso coloca em evidência a importância do uso de estruturas de infiltração que sejam leves, evitando-se, assim, perda da capacidade de infiltração do solo devido ao colapso estrutural. Essa constatação mostra a necessidade de se preservarem ou mesmo reduzirem as tensões inicialmente atuantes no solo, e nesse sentido as garrafas PET cumprem o seu papel.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de adensamento oedométrico para a tensão vertical de 100 kPa.

Índice de vazios	Adensamento
$e_{\text{antes da inundação}}$	0,49
$e_{\text{após a inundação}}$	0,39
CP	6,7%

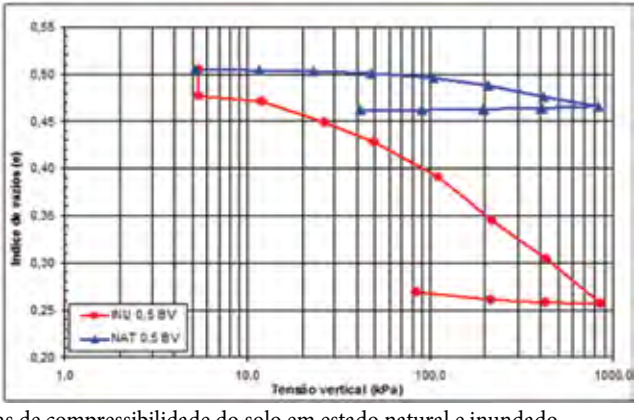


Figura 20. Curvas de compressibilidade do solo em estado natural e inundado.

6 Análise do colchão drenante enquanto sistema de infiltração

Dos resultados obtidos em campo e no laboratório verifica-se que, considerando-se o peso de 50 g por garrafa PET, 10 cm de coluna de areia com peso específico de 15kN/m^3 e o colchão drenante cheio de água, sendo este volume transferido ao solo de fundação como sobrecarga, obtém-se uma tensão vertical de trabalho igual a aproximadamente 5,5 kPa, ou seja, a solução estudada solicita o solo suporte com um nível de tensão inferior ao existente antes na condição natural (8 kPa). Com isso, todos os cálculos de infiltração podem ser efetuados com base nas características do solo no estado natural.

Considerando-se os dados de infiltração contidos na Tabela 1, seria recomendável para o caso analisado aprofundar um pouco a profundidade do colchão de modo a melhorar a taxa de infiltração do solo. Por exemplo, a se passar da profundidade de 0,50 m para a 0,80 m, ter-se-ia uma taxa de infiltração de 45 mm/h em lugar de 11,7 mm/h, o que cobriria a maioria dos índices pluviométricos regionais, além de ampliar a capacidade de armazenamento. Assim, se em uma hora precipitar 45 mm, seria possível coletar, considerando-se apenas a parcela de solo não saturada (0,50 m), a água de uma área equivalente a aproximadamente cinco vezes a área do colchão drenante. Essa informação é útil na definição do coeficiente de ocupação do solo nos casos em que se preveja que cada ocupante será responsável pela evacuação da água proveniente da área impermeabilizada.

Destaca-se, finalmente, que dentro da técnica concebida não há risco de comprometimento da capacidade de infiltração do solo em consequência do colapso estrutural, pois este não deve em princípio ocorrer, uma vez que a tensão total induzida pelo sistema é inferior àquela originalmente atuante como no perfil de solo natural. Tem-se ainda, diante dos valores de coesão obtidos, mesmo para a condição residual, que os riscos de ruptura dos taludes do colchão são mínimos.

7 Conclusões

Esta pesquisa torna-se relevante ao associar a técnica e o custo na solução de questões ambientais atuais, como o do beneficiamento das garrafas PET, o da recarga dos aquíferos e o da redução do risco de inundações junto aos centros urbanos.

O sistema de infiltração proposto ao associar as características dos materiais utilizados na construção de colchão drenante, ao potencial de colapso ou de erosão dos solos regionais, mostra ser possível a mitigação dos riscos técnicos e dos danos ambientais, com solução de menor custo que os resultantes de práticas convencionais.

Ao término deste estudo, referente à análise dos materiais utilizados e das características do maciço receptor, chegou-se às seguintes conclusões:

– o uso das garrafas PET no colchão drenante contempla: aspectos ambientais, ao dar destinação às garrafas; sociais, ao valorizar o trabalho dos catadores, e técnico, ao possibilitar maior capacidade de acumulação de águas pluviais no colchão drenante e menor sobrecarga sobre o solo suporte;

– o modo como as garrafas PET são dispostas (no presente estudo optou-se pelo uso das garrafas inteiras) reflete na deformabilidade e eficiência do sistema;

– a infiltrabilidade obtida para os solos estudados habilita seu uso em sistemas de filtração;

– considerando-se os resultados de laboratório, verifica-se que a infiltração pelo fundo do colchão, se preservadas as características do solo, merece ser considerada, tendo em vista a elevada permeabilidade vertical dos solos regionais e dos solos tropicais de um modo geral;

– para manter as condições de infiltrabilidade nos sistemas, deve-se considerar que não haja deformabilidade considerável do solo suporte, pois esta acarretaria a diminuição da permeabilidade e a perda da eficiência do sistema;

– o solo estudado pode ser classificado, na UFRR, como de natureza arenosa (sedimentação com defloculante), enquadrando-se no estado natural como uma areia fina a média (sedimentação sem defloculante), ao passo que, na MCT, é classificado como areia laterítica a solo arenoso laterítico (LA-LA'), e das análises gerais, tal como a textural, o melhor seria enquadrá-lo simplesmente como areia laterítica (LA);

– com relação aos parâmetros de resistência, conclui-se que o solo, dado o seu caráter predominantemente arenoso, tem sua resistência atrelada à sucção e à provável cimentação oriunda do processo de intemperismo;

– as análises desenvolvidas no presente estudo mostram que a utilização de garrafas PET em sistemas de infiltração para a solução do problema de colapso e ampliação da capacidade de armazenamento de água pode ser vantajosa tanto técnica como sócio-economicamente, permitindo com menor custo assegurar melhores condições de armazenamento e infiltração;

– considerando-se os fatores ecológicos mais discutidos nos dias de hoje, como é o caso da preocupação com a qualidade da água, com a disposição dos resíduos plásticos no meio ambiente e com os processos erosivos gerados pela ampliação do fluxo superficial, tem-se que: não só o uso de garrafas PET, como também a própria implantação de colchão drenante contribuem para a mitigação dos danos ambientais ora existentes junto aos centros urbanos, principalmente nas áreas de expansão.

– a implantação dos sistemas de infiltração devem ser antecedidos de estudos de laboratório e de campo, objetivando a caracterização do perfil quanto à capacidade de infiltração, à capacidade de suporte, à possibilidade de erosão interna e de colapso estrutural do solo.

Agradecimento

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à Universidade de Brasília, à Universidade Federal de Roraima, ao CNPq (Edital MCT/CNPq/CT-HIDRO - Nº040/2006) e a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a execução deste trabalho e obtenção dos dados.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8 p .

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio). Rio de Janeiro, 8 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 9604: Solo – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). NBR 10838: Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas (método da balança hidrostática). Rio de Janeiro, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). NBR 12007: Ensaio de adensamento unidimensional . Rio de Janeiro, 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (1996). Ensaios de permeabilidade em solos – Orientações para sua execução. Coordenação Antonio Manuel dos Santos Oliveira e Diogo Correa Filho. Boletim 04, 3. ed. rev. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. (2005). Técnicas compensatórias em drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH (Associação Brasileira de Recursos Hídricos).

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C.; PEREIRA, J. H. F. (2002). Courbes caracteristiques d'un profil d'alteration. *In:* THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. Recife: ABMS/ISSMGE, vul. 1, pp. 289-294.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEROUEIL, S. (2000). Modelo de normalização de curvas características. *In:* REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32, 2000 Brasília. Anais... Brasília, DF: ABPv. p. 96-106.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C. (2010). Cartilha de infiltração. Série Geotecnia. v. 2. Brasília, DF: UNB. 36 p.

CARDOSO, F. B. F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Brasília: Tese de Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DT – 009A/02, 357 p.

CHEBBO, G. (1992). Solides des rejets pluviaux urbains caracterisation et traitabilité. 413 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne-la-Vallée, França.

CIRIA (1996). Infiltration drainage – Manual of good practice. Roger Bettes, MCIWEM. CIRIA Report 156.

GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Brasília, DF: UnB. 183 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM-090A/02.

GURJÃO, C. M. C (2008). Infiltração da água de chuva como meio de prevenção de inundações e erosões. Brasília, DF: UnB. 89 p. Pós-Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.PD.CG-01/08,

HOLZ, J.; TASSI, R. (2007). Usando estruturas de drenagem não convencionais em grandes áreas: o caso do loteamento Monte Bello. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007. São Paulo, SP. ABRH.

IDE, C. N.; DE LUCA, S. J. (1985). Qualidade da drenagem pluvial urbana. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 6, 1985, São Paulo. Anais... São Paulo: ABRH. v. 3, p. 135-141.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F., (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor. 213 p.

PAIXÃO, M. N. O. N.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1994). Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. *In*: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 2, 1994, Recife, PE: AMFS-UFPE/ABMS-NE. p. 105-110.

SOUZA, V. C. B. (2002). Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial. Porto Alegre, RS: UFRGS. 127 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, J. P. (2007). Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração. Brasília, DF: UnB. 155p. Dissertação (Mestrado Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM - 154 /07,

URBONAS, B.; STAHRE, P. (1993). Stormwater. Best management practices and detention for water quality, dranage and CSO management. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 447 p.

Capítulo 18
Trincheiras como estruturas de infiltração

Joseleide Pereira da Silva
José Camapum de Carvalho
Ennio Marques Palmeira

1 Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento desordenado e sem os estudos mínimos necessários vem se somando às deficiências pré-existentes em áreas urbanas e periurbanas, especialmente no que tange a infraestruturas como saneamento, abastecimento de água e transporte. Não parece haver, infelizmente, uma preocupação marcante com a vida e sua qualidade.

Atualmente, várias problemáticas humanas se maximizam, transformando-se em verdadeiras catástrofes socioambientais quando associadas a eventos climáticos. Nesse sentido, em diversas épocas do ano, destaca-se nos noticiários nacionais a necessidade de maiores cuidados com o meio ambiente, o qual se expressa de diversas formas e sempre busca o equilíbrio quando ocorre o rompimento. Este rompimento demonstra a incompatibilidade de certas atividades humanas com o equilíbrio ambiental, podendo ser citada a inadequada ocupação e uso do solo. Cabe destacar que muitos dos problemas urbanos, como é o caso das inundações, têm quase sempre parte da origem situada nas áreas rurais. Enquanto nas áreas rurais o escoamento superficial é facilitado por manejos inadequados, nas urbanas o grande problema é o excesso de impermeabilização da superfície do solo. Como consequência, surge a necessidade de disciplinar a ocupação e o uso do solo em áreas rurais e urbanas, em ambas buscando-se favorecer o equilíbrio do balanço hídrico pré-existente por meio da infiltração planejada das águas pluviais.

O ciclo hidrológico é conceito muito importante na hidrologia. É o fenômeno global de circulação da água nos seus diferentes estados físicos, que ocorre entre a hidrosfera e a atmosfera. Esse movimento permanente é impulsionado pela energia do sol associada à gravidade e à rotação terrestre. A energia solar aquece a água superficial resultando na sua evaporação. O vapor de ar condensa-se, formando as nuvens. A gravidade faz com que a água condensada volte à superfície em forma de precipitação. Uma vez na superfície, a água circula, podendo escoar sobre o solo até atingir cursos d'água, reservatórios, mares e oceanos ou infiltrar nos solos e nas rochas, através de poros, fissuras e/ou fraturas, umedecendo-os e alimentando os aquíferos subterrâneos. Parte da água que se infiltra no solo é absorvida pela vegetação e, por meio da evapotranspiração, é devolvida à atmosfera. O equilíbrio desses fatores é denominado balanço hídrico.

Dentre os fatores condicionantes no ciclo da água, relacionado à infiltração e ao escoamento, estão o solo e o perfil que ele apresenta.

A parte superior da crosta terrestre é normalmente porosa devido ao constante intemperismo das rochas na formação dos solos. Essa faixa da litosfera é composta por partículas sólidas e poros preenchidos com água ou água e ar (Figura 1). A vegetação situa-se no topo da zona denominada zona não saturada ou de aeração, onde os poros estão apenas parcialmente preenchidos com água.

A água precipitada não absorvida pelas plantas continua, por gravidade, a infiltrar-se até atingir a zona denominada de saturada, onde pode entrar na circulação subterrânea, contribuindo para a recarga dos aquíferos. O topo da zona saturada em contato com a pressão atmosférica corresponde ao nível freático. A água subterrânea pode ressurgir na superfície em forma de nascentes.

A quantidade e a velocidade com que a água circula em diferentes fases do ciclo hidrológico são influenciadas por diversos fatores, como: a cobertura vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia estrutural.

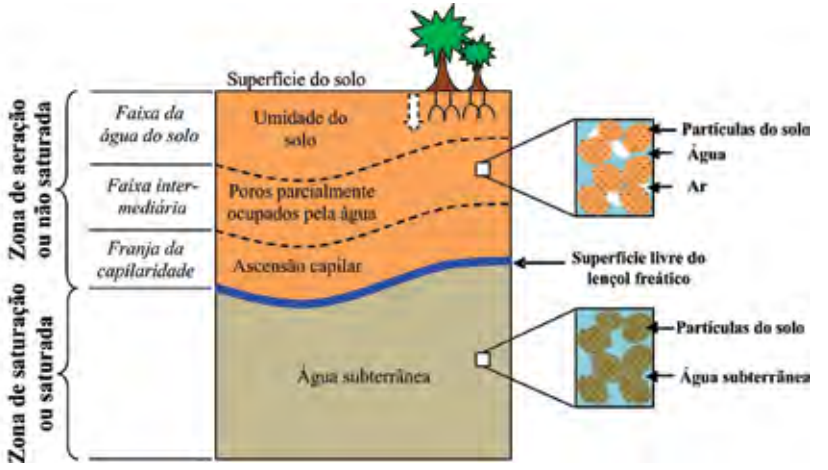


Figura 1. Zonas de ação da água no solo ou zonas de passagem da água no solo.

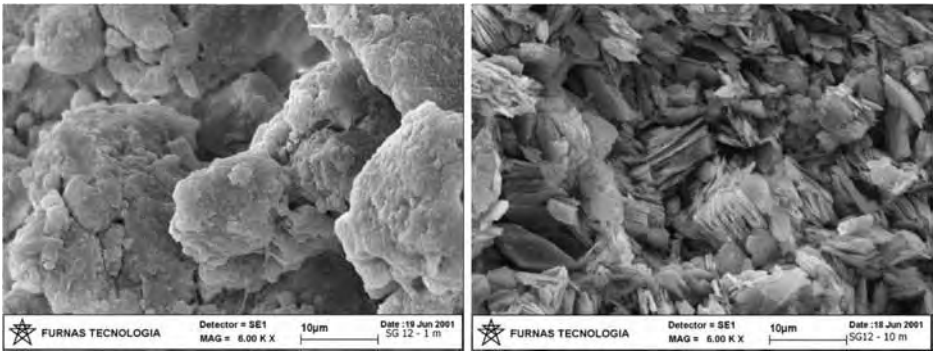
Visando minimizar esses efeitos negativos, existem diversas técnicas na literatura e na engenharia que buscam a adequada destinação dos fluxos de águas superficiais, algumas não estruturais, como a educação ambiental, e outras estruturais, como as galerias de drenagem. Entretanto, enquanto as ações não estruturais são muitas vezes relegadas a um segundo plano, as técnicas estruturais convencionais usualmente trazem consigo restrições técnicas, econômicas, ambientais e sociais. Diante disso, surgem, por um lado, a busca de maior ênfase na educação ambiental por meio da popularização da ciência e, por outro, as propostas de técnicas de estruturas alternativas de compensação de fluxos, as técnicas estruturais não convencionais. Neste caso, busca-se compensar na fonte a parcela que seria infiltrada naturalmente, mas que, por meio de impermeabilizações diversas, somou-se ao fluxo superficial. No leque de opções estão as trincheiras, as valas e os poços de infiltração. Deve ser avaliada a viabilidade técnica e econômica de cada uma delas, observando-se os contextos urbanístico, paisagístico e arquitetônico.

Este capítulo aborda o tema infiltração por meio de trincheiras, tomando como exemplo alguns aspectos e resultados obtidos por Silva (2012) em estudos realizados a partir de ensaios

de laboratório e de testes de infiltração realizados em sete trincheiras de pequenas dimensões construídas no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília. As trincheiras foram construídas usando-se diferentes materiais e, em alguns casos, os mesmos materiais distribuídos em diferentes proporções. O estudo realizado por Silva (2012) sobre trincheiras é muito mais amplo do que o aqui apresentado, podendo ser consultado gratuitamente no *site* www.geotecnia.unb.br.

2 Aspectos relativos aos mecanismos de infiltração

Os solos profundamente intemperizados, como é o caso do perfil de solo do Distrito Federal, são compostos predominantemente por macro e microporos (Figura 2a). Os microporos encontram-se majoritariamente integrando os agregados, e os macroporos são constituídos pelos espaços vazios existentes entre os agregados. Enquanto a capacidade de armazenamento está diretamente ligada aos vazios totais presentes nesses solos, a percolação geralmente se restringe aos mesoporos e, principalmente, aos macroporos, devido a menor energia necessária para que ocorra o fluxo. Os solos pouco intemperizados, por sua vez, são constituídos por partículas que guardam certa independência entre elas (Figura 2b). Nesses solos, podem ainda estar presentes pacotes de argila. Os solos pouco intemperizados apresentam distribuição de poros que podem ir de bem graduada a uniforme, segundo a textura do solo.



(a) (b)

Figura 2. a) Solo profundamente intemperizado; b) solo pouco intemperizado.

O movimento da água no interior do maciço está ligado a duas formas de energia: a gravitacional oriunda da coluna de água e considerada externa, e a correspondente ao potencial de sucção ou capilaridade que é considerada interna. A energia interna pode ser oriunda das cargas de superfície dos minerais, forças de adsorção, energia de sucção e/ou de forças de natureza capilar, energia capilar. Para entender o mecanismo de fluxo nos mantos de solos tropicais não saturados, faz-se necessário, portanto, entender não apenas a forma da curva características de retenção de água desses solos, mas também a microestrutura do solo e a mineralogia. Em um perfil de intemperismo, parte-se da rocha (geralmente rocha sã seguida da rocha alterada) considerada impermeável, passa-se à camada de solo saprolítico (alguns

autores dividem em saprólito e solo saprolítico), solos pouco intemperizados, pouco permeáveis, alcança a transição (solo comumente heterogêneo quanto às propriedades e aos comportamentos) para, então, atingir os solos lateríticos, solos profundamente intemperizados, porosos e quase sempre providos de elevada permeabilidade.

A estrutura, a composição químico-mineralógica e a forma da curva característica, serão, nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, distintos daqueles dos solos pouco intemperizados, solos saprolíticos. Mas qual dos solos comandaria o processo de infiltração? Depende de alguns fatores externos e internos, como no caso da energia. São exemplos de fatores externos a intensidade e distribuição das precipitações, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, as características geomorfológicas, o uso, ocupação e a cobertura do solo, embora quase sempre muitos deles não sejam considerados como elementos de avaliação, seja porque apresentam elevada variabilidade, seja porque se desconhecem os seus reais efeitos. São exemplos de fatores internos a espessura do manto de intemperismo, o nível de intemperização sofrido, a temperatura e a umidade inicial do solo, a composição química do fluido pré-existente. Da mesma forma, poucos fatores são considerados como elementos de avaliação, apontando para o fosso existente entre o que se mede em termos de infiltração e o que se conhece como fator que nela intervém.

Na análise da infiltração em mantos de intemperismo, é importante que se busquem entender os mecanismos de fluxo nos solos pouco intemperizados e nos solos profundamente intemperizados.

Nos solos profundamente intemperizados, deve-se inicialmente verificar se a umidade nele presente está ou não saturando os microporos, o que pode ser feito de modo estimativo conhecendo-se a umidade do solo e a umidade correspondente à entrada de ar nos microporos. A umidade de entrada de ar dos microporos corresponde ao teor de umidade de sua saturação. Encontrando-se em estado não saturado, o que não é comum, a água, ao penetrar no solo, será captada pelos agregados devido à elevada sucção presente nos microporos. Estando saturados, a água fluirá pelos meso e macroporos; no entanto, se o volume de água que penetra no solo for grande o suficiente para atuar como uma frente de saturação, o ar será colocado sob pressão, o qual passará a atuar como uma barreira ao fluxo. Diante desses e de outros aspectos, não é difícil antever a importância da intensidade e da distribuição das precipitações no processo de infiltração.

Enquanto nos solos profundamente intemperizados o fluxo depende mais do arranjo entre os agregados que daquele entre as partículas que os compõem, nos solos pouco intemperizados a dependência passa a ser mais ligada à natureza químico-mineralógica e ao arranjo estrutural interpartículas.

Nos solos profundamente intemperizados, a anisotropia de comportamento hidráulico e mecânico, quando ocorre, é geralmente fruto de lixiviação entre os agregados em uma direção e na outra não. Já nos solos pouco intemperizados, essas anisotropias estão ligadas à estrutura formada pelas partículas. Essa estrutura está geralmente vinculada à rocha de origem, embora possa ter sofrido influência do estado de tensões. Entretanto, o ponto mais relevante na análise da infiltração é buscar entender como se dá a movimentação da água nesses solos, seja na estrutura dispersa ou na floculada.

Cabe inicialmente destacar que os solos pouco intemperizados encontram-se, muitas vezes, em estado saturado, abaixo do nível d'água. Mineralogicamente, é comum possuírem

em sua composição argilominerais expansivos, contrariamente ao que ocorre nos solos profundamente intemperizados. Por outro lado, encontrando-se em estado não saturado e tendo presentes argilo minerais expansivos, a água infiltrada só fluirá em sua totalidade pelos vazios inicialmente presentes no solo se os minerais forem impedidos de expandir. Expandindo-se, dois fenômenos vão ocorrer: parte da água penetrará na estrutura do mineral no processo de expansão e, expandindo-se o mineral, aumentará ou diminuirá o volume de vazios presentes no solo, afetando o fluxo. Campos *et al.* (2008), ao analisar curvas características de duas bentonitas, mostram a importância de se considerar separadamente a variação do volume de vazios do solo da variação da distância interplanar basal quando se analisa o comportamento dos solos expansivos.

Portanto, entender-se o perfil de solo é fundamental para que se entenda o processo de infiltração. No presente estudo, o manto de intemperismo é espesso. Os ensaios e as estruturas de infiltração adotadas são pouco profundos. Assim, é possível entender que os resultados obtidos dizem respeito tão somente ao comportamento dos solos profundamente intemperizados.

3 Trincheiras como estruturas de infiltração

As trincheiras de infiltração são estruturas que se caracterizam por atuarem pontualmente e têm por objetivo captar, armazenar e infiltrar águas pluviais oriundas de áreas de extensão limitada, tais como casas, edifícios, instalações comerciais, industriais, estacionamentos, e junto a ruas e avenidas. Ao mesmo tempo em que contribuem para reduzir o volume de águas pluviais escoados pelos sistemas de drenagem convencionais, as trincheiras diminuem as vazões máximas que provocam enchentes, alagamentos e inundações.

São escavadas no solo de tal forma que caracterize uma estrutura linear na qual o comprimento prepondera sobre a largura, e esta pode ou não preponderar sobre a profundidade. Para maiores captações, geralmente a largura prepondera sobre a profundidade, ampliando a importância da infiltração vertical em detrimento da horizontal.

As trincheiras podem ser ou não preenchidas com materiais drenantes, tais como seixo rolado, brita, pneus e garrafas PET. Neste capítulo, são apresentados os resultados de um estudo utilizando-se garrafas PET e Brita 2 como material de enchimento. Para comparação, utilizou-se também uma trincheira revestida com tijolo em crivo sem material de enchimento. Quando se utiliza material de enchimento, é recomendável o uso de um geotêxtil entre o enchimento e as paredes da trincheira, recobrindo-o. O geotêxtil tem a dupla função de atuar como filtro e como elemento de distribuição do fluxo nas laterais e no fundo da trincheira. No uso de material de enchimento, deve ser privilegiada a maior porosidade para esse material, de modo a maximizar a capacidade de armazenamento e minimizar a perda de energia no fluxo interno. Sobre o geotêxtil que recobre a trincheira é recomendável a colocação de uma camada de aproximadamente 10 cm de material permeável, de modo a protegê-lo contra os raios solares e outros danos.

Além de especificações apropriadas para as dimensões e materiais de enchimento das trincheiras, devem ainda ser observados a infiltrabilidade do maciço, a presença de lençol freático, o risco de sua contaminação e o risco que oferece a infiltração para as obras existentes

na área de influência. Finalmente, deve ser avaliado o risco de erosão interna e de esqueletização do maciço em função do fluxo oriundo da infiltração.

A Tabela 1 apresenta características de maciços em relação à capacidade de infiltração. Cabe destacar que os solos tropicais geralmente não se enquadram em tabelas como esta, a menos que a classificação textural leve em conta a matriz de solo no estado natural, ou seja, que não se promova a desagregação do solo.

Tabela 1. Ordem de grandeza da condutividade hidráulica em diferentes solos (MUSY e SOUTTER, 1991 *apud* LIMA, 2009).

k (m/s)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Tipos de solos	Seixos sem areia nem elementos finos		Areia com seixos, areia grossa a fina			Areia muito fina, silte grosso a silte argiloso			Argila siltosa a argila homogênea		
Possibilidade de infiltração	Excelente		Boa			Média a baixa			Baixa a nula		

A Figura 3 ilustra um sistema de infiltração por trincheira junto a uma rodovia.

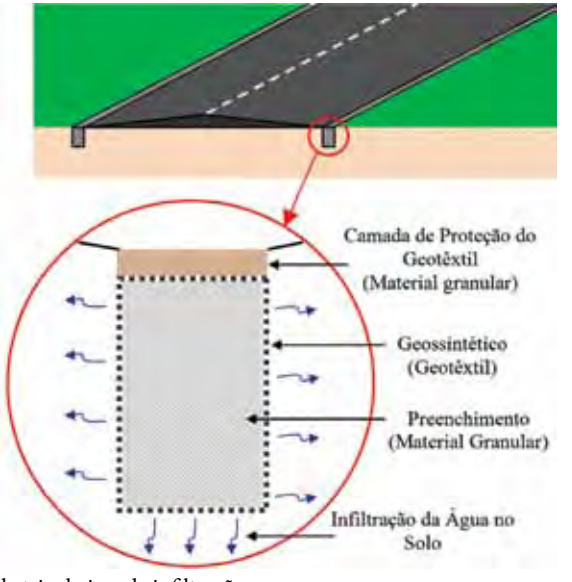

Camada de Proteção do Geotêxtil (Material granular)
Geossintético (Geotêxtil)
Preenchimento (Material Granular)
Infiltração da Água no Solo

Figura 3. Ilustração de trincheiras de infiltração.

Ao se projetar um sistema de infiltração, como é o caso das trincheiras, faz-se necessário atentar para limites mínimos e máximos da capacidade de drenagem do maciço a serem respeitados. O limite mínimo se refere à capacidade de drenagem do solo, que não deve ser muito baixo de modo a assegurar a infiltração, e o limite máximo se refere ao potencial de remoção de poluentes de modo a se evitar o risco de contaminação do aquífero, pois se a condutividade hidráulica for muito alta, o solo não terá tempo de filtrar os poluentes. Geralmente o nível de contaminação das águas pluviais não é muito elevado; no entanto, elas podem ser contaminadas após a sua precipitação. Mesmo sendo baixo, deve ser avaliado o efeito em

longo prazo da composição química das águas pluviais, em especial do pH, sobre o processo de lixiviação e instabilização estrutural do solo. Outra recomendação que se faz, independentemente do sistema de infiltração adotado, é a adoção de sistemas de pré-filtragem e/ou pré-descotaminação, para garantir maior vida útil para a trincheira e melhor funcionalidade. Quando se capta água de enxurrada contendo solo em suspensão, torna-se recomendável o uso de sistema complementar de decantação prévia de sedimentos, para que se evite a colmatação dos vazios da trincheira e do geotêxtil de transição entre o enchimento e o maciço.

As trincheiras, além de terem uma boa relação custo-benefício, propiciam a redução do volume de escoamento superficial, possibilitam a recarga do lençol freático e permitem ser integradas à paisagem, como ilustra a Figura 4. Alguns autores, como Baptista *et al.* (2005), citam como inconvenientes do sistema a necessidade de manutenção periódica, as restrições de eficiência em áreas de forte declive e o risco de poluição do lençol freático, problemas estes sanáveis com certa facilidade.

Figura 4. Disposição de trincheiras de infiltração (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2010).

3.1 Considerações sobre a implantação das trincheiras

A forma (comprimento, largura, profundidade) e a localização das trincheiras devem ser definidas em função do espaço disponível e da composição com o plano urbanístico e com os projetos paisagístico e arquitetônico, com atenção especial para as questões de engenharia. Nesse sentido, devem-se observar os riscos para as fundações, de ascensão de umidade nas paredes e nos pisos internos e a possibilidade de evacuação em direção ao sistema de drenagem coletivo nos casos de extravasamento da capacidade deletora da trincheira.

Existem outros critérios que orientam a escolha do local e a implantação das trincheiras de infiltração, tais como os apresentados a seguir (BAPTISTA *et al.*, 2005; URBONAS e STAHRE 1993):

- profundidade do lençol freático e da camada impermeável;
- declividade do terreno no sentido longitudinal da trincheira, pois a sua utilização pode ficar limitada em virtude da redução do volume útil de armazenamento;
- tipo de solo;
- uso do solo e cobertura vegetal;

- relação entre a superfície impermeabilizada da bacia e a superfície disponível para infiltração;
- topografia do terreno, pois a inclinação do terreno intervém na determinação do sentido preponderante do escoamento da água sobre as superfícies drenadas para as trincheiras;
- capacidade de absorção do solo.

Urbonas e Stahre (1993) recomendam a não implantação de trincheiras e a não disposição de água de escoamento superficial em estruturas de infiltração, caso seja observado algum dos aspectos a seguir, tendo sido incorporadas pelos autores deste capítulo as observações entre parênteses:

- se o NA máximo sazonal do lençol estiver a menos de 1,2 m abaixo do fundo da trincheira (caso esta regra não seja observada, deve-se dispensar atenção especial para a qualidade da água a ser infiltrada, de modo a evitar contaminação do lençol freático);
- se a camada impermeável estiver a menos de 1,2 m abaixo do fundo da trincheira (a não observância desta regra implica priorização do fluxo pelas laterais da trincheira e melhor análise de sua geometria e dos reflexos dessa infiltração com predomínio do fluxo horizontal nas obras de engenharia);
- se o solo estiver na classificação C ou D do *Soil Conservation Service* ou se a taxa de infiltração do solo saturado for inferior a 8 mm/h;
- se a superfície de infiltração for um aterro (infiltrações em aterros apresentam elevado risco de subsidência com imposição, dentre outros, de atrito negativo em fundações profundas);
- se houver proximidade com captação de água em poços (caso seja próximo, faz-se necessário maior controle da água de infiltração);
- se o local apresentar uma excessiva movimentação de terra, pois pode gerar um aporte significativo de sedimentos para o interior da estrutura (neste caso, é possível a implantação de estruturas de pré-filtragem da água a ser infiltrada).

3.2 Vantagens e desvantagens

Segundo Souza (2002), as trincheiras de infiltração apresentam vantagens e desvantagens para a área onde foram implantadas.

As vantagens são:

- redução do escoamento superficial;
- ganho financeiro pela redução das dimensões das tubulações do sistema de drenagem a jusante;
- baixo custo;
- redução dos riscos de alagamento e inundação;
- fácil construção;
- boa integração no meio urbano, possível de ser implantada de forma a ser imperceptível no arranjo urbanístico e paisagístico;
- recarga do aquífero subterrâneo.

As desvantagens são:

- possibilidade de colmatação, fazendo-se necessárias vistoria e manutenção periódica;
- limitações no caso de declividade longitudinal superior a 5% no caso de trincheiras muito longas, pois a água permanece em nível;
- risco de poluição do lençol subterrâneo, podendo ser necessário controle periódico da água de infiltração.

3.3 Dimensionamento

Existem vários métodos para se determinar as dimensões e a funcionalidade de estruturas de infiltração. Urbonas e Stahre (1993) apresentam o *rain-envelope-method*, uma metodologia de dimensionamento expedito de estruturas de percolação que utiliza dados de caracterização do local de implantação e das curvas de intensidade, duração e frequência de chuva (IDF).

O método baseia-se na determinação da máxima diferença entre o volume afluente (parcela do volume precipitado que foi drenado para a trincheira) e o volume infiltrado (volume acumulado de entrada e saída do dispositivo). A curva de valores acumulados, no tempo, dos volumes afluentes ao dispositivo que é construída com base nas vazões obtidas a partir na curva IDF local é comparada com a curva de valores dos volumes dele efluentes determinados a partir das vazões obtidas das características de infiltração do solo. A máxima diferença entre as duas curvas é o volume de acumulação para o qual será dimensionado o sistema, levando-se em consideração a porosidade do material de preenchimento da trincheira. Nesse sentido, sistemas como o que utiliza garrafas PET perfuradas maximizam a capacidade de armazenamento em relação a sistemas convencionais de enchimento, como o que utiliza brita.

Contudo, o método apresenta algumas desvantagens. Uma delas é que o volume infiltrado é estimado com base na formulação de Darcy para solo saturado, o que, de acordo com Graciosa *et al.* (2008), pode subestimar a capacidade de infiltração da trincheira, uma vez que considera a taxa de infiltração do solo constante e igual à taxa de infiltração na condição de saturação (situação limite). Outra desvantagem é o volume afluente ser calculado com base no método racional, o qual, segundo Mikkelsen *et al.* (1996) *apud* Lima (2009), negligencia o efeito de chuvas sucessivas.

O volume dimensionado para trincheira deve ser calculado com base na maior diferença entre o volume afluente e o volume infiltrado, sendo o cálculo efetuado segundo o processo interativo a seguir (LIMA, 2009):

1. calcula-se o volume afluente;
2 estimam-se as dimensões iniciais da trincheira, lembrando que a vazão de saída depende da superfície de infiltração, ou seja, da área lateral e de fundo da trincheira e que nem sempre o fluxo nas duas direções é o mesmo;
3. calcula-se o volume infiltrado;
4. constrói-se a curva acumulada com os volumes afluente e infiltrado;
5. identifica-se o ponto de máxima diferença entre as curvas de volumes acumulados;
6. determina-se o volume necessário de armazenamento, levando em consideração a porosidade do material de preenchimento e

7. compara-se o volume da trincheira com o volume de dimensionamento – se o volume da trincheira for maior ou menor que o volume dimensionado, recomeça-se o processo a partir do passo 2 até a convergência dos resultados.

As dimensões iniciais da trincheira, muitas vezes, sofrem restrições impostas pela limitação de área disponível para implantação. Na relação entre comprimento, largura e a profundidade devem-se levar em conta vários aspectos como: profundidade no nível d'água, profundidade do estrato impermeável e as permeabilidades horizontal e vertical.

Quanto ao material de enchimento das trincheiras, dois aspectos são essenciais: a porosidade e, por consequência, a capacidade de armazenamento e as tensões que induzem os solos susceptíveis a alterarem a sua capacidade de infiltração. Dependendo da destinação que se dará à área ocupada pela trincheira, deve-se também atentar para a sua deformabilidade quando solicitada por carregamentos externos.

3.4 Execução e manutenção

Terminada a fase de dimensionamento, parte-se para a execução propriamente dita. Alguns cuidados, como os descritos a seguir, devem ser tomados para evitar um mau funcionamento do dispositivo (Souza 2002).

1. Na área planejada para a infiltração, deve-se evitar a utilização de equipamentos pesados, pois podem compactar o solo e diminuir sua capacidade de infiltração.
2. Após a escavação da trincheira, deve-se colocar manta geotêxtil no fundo e nos lados do dispositivo para prevenir ou minimizar o processo de colmatação no solo e da própria trincheira quando de eventual fluxo reverso. O uso do geotêxtil objetiva também promover a distribuição do fluxo ao longo da base e das laterais da trincheira.
3. O material de preenchimento deve ser limpo e isento de finos, de modo a evitar a colmatação da estrutura e contaminação do solo e lençol freático. No caso de uso de materiais granulares, como a brita e o seixo rolado, deve ser estudada a distribuição granulométrica que maximize o volume de poros no material de enchimento.
4. Deve-se instalar na trincheira um duto para monitoramento do seu desempenho quanto ao enchimento e à drenagem.

Concomitantemente ou logo em seguida à construção da trincheira, algumas medidas precisam ser adotadas para aumentar a vida útil do sistema de infiltração. A principal delas consiste na construção de estruturas de remoção de sedimentos, como tanques de decantação ou faixas gramadas, que têm a finalidade de minimizar o processo de colmatação que ocorre principalmente na base da trincheira. Inspeções regulares é uma prática preventiva que pode conduzir à maior eficiência e durabilidade do sistema de infiltração. Em casos de risco de contaminação do lençol freático e do próprio solo, deve ser previsto dispositivo de coleta periódica da água de infiltração para controle de qualidade.

3.5 A função do geotêxtil nas trincheiras de infiltração

O geotêxtil tem com função funcionar como elemento filtrante, evitando que o material drenante da trincheira seja colmatado pelos finos oriundos do solo circunvizinho (solo base).

Durante a infiltração de água para o terreno natural, isso não se constitui em um problema, pois o sentido do fluxo é de dentro da trincheira para fora. Entretanto, a trincheira de infiltração também funcionará como trincheira drenante no caso de elevação do nível do lençol freático ou percolação de água que infiltre pelas laterais em épocas de chuva. Nesse caso, o sentido do fluxo será de fora da trincheira para o seu interior, quando então o geotêxtil funcionará como filtro.

O mais comumente utilizado nesse tipo de aplicação é o geotêxtil do tipo não-tecido, onde os filamentos são distribuídos de forma aleatória na manta. Tais filamentos podem ser solidarizados uns aos outros por processos mecânicos, químicos ou térmicos, dependendo do produto ou do fabricante.

Para o bom funcionamento de um geotêxtil como filtro, os critérios a seguir mencionados devem ser atendidos.

1. Critério de retenção: visa avaliar se o geotêxtil é capaz de reter os grãos de solo, evitando que o atravessem e, com o tempo, colmatem o elemento drenante da trincheira. Vários critérios de retenção estão disponíveis na literatura (PALMEIRA e FANNIN, 2002), os quais comparam as dimensões dos grãos do solo a ser retido com a abertura de filtração do geotêxtil. A abertura de filtração de um geotêxtil é o tamanho de abertura correspondente ao diâmetro do maior grão capaz de atravessá-lo.
2. Critério de permeabilidade: visa garantir que ao longo da vida útil da obra o filtro manterá permeabilidade elevada, proporcionando condições adequadas de fluxo normal ao seu plano. Os critérios de permeabilidade comparam a permeabilidade normal do geotêxtil com a permeabilidade do solo base (solo em contato com o geotêxtil). Para condições críticas ou severas, a maioria das especificações exige que o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil seja igual ou maior que 10 vezes o coeficiente de permeabilidade do solo base. Entretanto, situações específicas podem requerer valores maiores para essa relação.
3. Critério anticolmatação: visa evitar que o filtro geotêxtil seja colmatado durante a vida útil da obra. Nesse caso, o filtro deve possibilitar que uma parcela pequena de grãos do solo base seja capaz de atravessá-lo, com a finalidade de evitar que esses grãos se acumulem sobre a face do filtro (cegamento do filtro) ou o colmate internamente (quantidade excessiva de grãos impregnando o geotêxtil). Os critérios anti colmatação comparam a abertura de filtração do geotêxtil com o diâmetro característico (geralmente D_{15}) das partículas do solo base que seriam capazes de migrar através dos vazios desse solo. Ensaios de filtração específicos podem também ser necessários para verificar a compatibilidade entre o filtro geotêxtil e o solo de base (PALMEIRA e FANNIN, 2002).
4. Critério de sobrevivência: estabelece valores mínimos de propriedades relevantes de modo a se garantir que o filtro não será danificado durante o manuseio e a instalação e que apresentará durabilidade compatível com a vida útil esperada da obra. Nesse caso, são requeridos valores mínimos de resistência à tração, de resistência ao rasgo e de durabilidade ao ataque por substâncias agressivas, por exemplo.

De particular importância no caso de trincheiras de infiltração é se evitar o ingresso de água com sólidos em suspensão pelo seu topo, como consequência de escoamento superficial, trazendo tais sólidos ou mesmo substâncias ou resíduos indesejados. Isso deve ser evitado, pois

tenderá a colmatar o filtro geotêxtil e, posteriormente, o próprio material drenante da trincheira, reduzindo a eficiência ou mesmo inviabilizando a infiltração de água no terreno. Durante a instalação da camada de geotêxtil, deve-se também garantir que a vala da trincheira esteja limpa, sem lama, detritos ou elementos que possam colmatar ou danificar o geotêxtil, e que a camada de geotêxtil seja instalada em perfeito contato com as paredes internas da trincheira.

4 Garrafas pet como material de enchimento de trincheiras

No Distrito Federal, tem sido dada ênfase ao estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de garrafas PET em sistemas de infiltração.

Paranhos (2002) estudou sistemas de drenagem alternativos de baixo custo para obras geotécnicas e de meio ambiente na cidade de Brasília, propondo a utilização de garrafas PET, pneus e entulhos de obra.

Silva (2007) associou a técnica ao custo na solução de questões ambientais atuais, como o do beneficiamento das garrafas PET, o da recarga dos aquíferos e o da redução do risco de inundações junto aos centros urbanos. O sistema de infiltração proposto, ao se associarem as características dos materiais utilizados na construção das trincheiras ao potencial colapsível e erodível dos solos regionais, mostra ser possível a mitigação dos riscos técnicos e dos danos ambientais como solução de menor custo que os resultantes das práticas convencionais. No estudo, foram construídas, mas não testadas, quatro trincheiras com aproximadamente 1,80 m de profundidade por 0,80 m de largura e 2 m de comprimento. Uma dessas trincheiras foi preenchida com brita 2, e três outras contiveram alturas distintas de garrafas PET cortadas ao meio e perfuradas.

Silva (2012) deu continuidade a esse estudo, construindo mais três trincheiras com dimensões semelhantes, uma sem enchimento e com paredes em tijolos em crivo, uma contendo garrafas PET inteiras e fechadas, e a terceira contendo garrafas PET amassadas. O conjunto de trincheiras foi, então, instrumentado e testado com monitoramento de nível d'água, sucção e umidade. Buscou-se analisar a eficiência de cada trincheira quanto ao tempo de infiltração da água no solo e ao avanço da frente de umedecimento e saturação.

Considerando-se os fatores ecológicos mais discutidos nos dias de hoje, como é o caso da preocupação com a qualidade da água, com a disposição dos resíduos plásticos no meio ambiente e com os processos erosivos gerados pela ampliação do fluxo superficial, tem-se que não só o uso de garrafas PET como também a própria implantação de trincheiras de infiltração contribuem para a mitigação dos danos ambientais ora existentes junto aos centros urbanos, principalmente nas áreas de expansão. Esses sistemas apresentam a vantagem de compensarem o excedente de águas pluviais não infiltradas próximo à fonte geradora, sendo possível a implantação de sistemas que sejam coletivos ou individuais.

Segundo Camapum de Carvalho e Lelis (2010), o uso de garrafas PET como material alternativo para a construção de trincheiras, além de contribuir para mitigar o problema ambiental gerado pelo excesso desses vasilhames lançados sem qualquer controle na natureza ou depositados nos aterros sanitários, possibilita maior volume de acumulação de água no interior da trincheira. A Figura 5 ilustra a utilização das garrafas PET na construção de trincheiras (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2010).

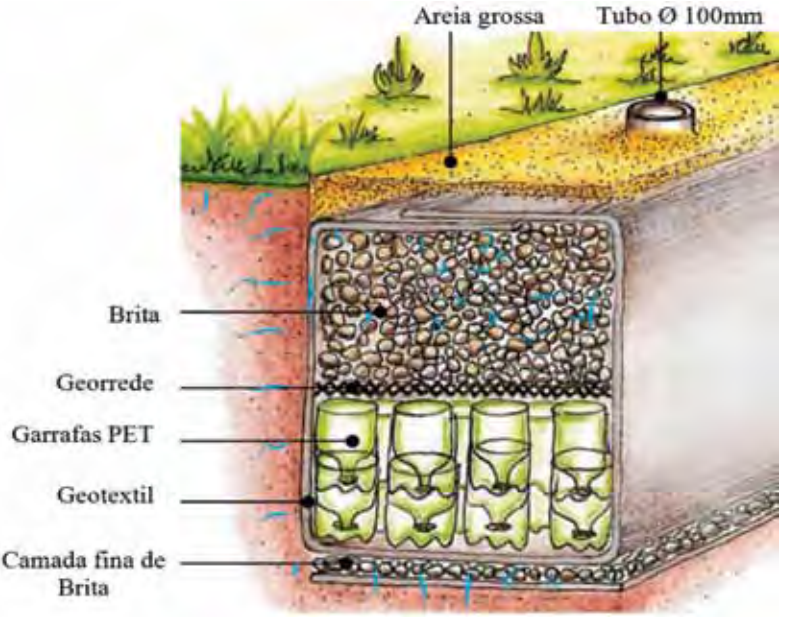


Figura 5. Trincheiras de infiltração com utilização de garrafas PET (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2010).

Apresenta-se a seguir a descrição das trincheiras executadas e ensaiadas por Silva (2012).

4.1 Materiais Utilizados no enchimento das trincheiras

Convencionalmente, as trincheiras são preenchidas com agregados pétreos graúdos, de modo a possibilitar a drenagem e garantir certo armazenamento de água. Seu peso excessivo, no entanto, geralmente termina por compactar ou consolidar o fundo da trincheira, reduzindo, assim, a capacidade de infiltração através do fundo. Buscando uma solução para o problema e a maximização do volume de águas pluviais a ser armazenado na trincheira durante o processo de infiltração, foi estudada a utilização de garrafas PET nesse sistema, em substituição à brita convencionalmente usada. Destaca-se que tal utilização contribui ainda para a solução de outro problema ambiental, o da destinação desses resíduos. As garrafas PET foram testadas em três situações: 1) cortadas perfuradas e acopladas (Figura 6a), compondo um sistema com baixa tensão induzida na base e capacidade máxima de armazenamento; 2) garrafas PET inteiras e fechadas (Figura 6b), constituindo um sistema que minimiza as tensões induzidas na base, mas limita o volume de armazenamento; 3) garrafas PET amassadas (Figura 6c) e fechadas, compondo um sistema intermediário em termos de tensões induzidas na base e de capacidade de armazenamento.

Os materiais utilizados na construção das células foram: areia grossa, brita 02, garrafas PET de 2 litros, geotêxtil não tecido tipo Bidim OP 20 (desempenhando a função de filtro) e tijolos cerâmicos com 20 cm x 20 cm x 10 cm de dimensões.

(a) (b)

(c)

Figura 6. Arranjo de garrafas: (a) cortadas, furadas e acopladas; (b) inteiras; c) amassadas.

4.2 Tipos de arranjos

Foram utilizados arranjos distintos para as sete trincheiras analisadas. A Tabela 2 apresenta os sete arranjos utilizados, esquematizados em escala na Figura 7.

Tabela 2. Tipos de arranjos estudados.

Trincheira	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Material de enchimento	PET Cortada	PET Cortada	PET Cordada	Brita	PET Inteira	Tijolo	PET Amassada
Altura de areia (m)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	–	0,10
Altura de brita 2 (m)	0,93	1,23	0,34	1,69	0,35	–	0,95
Altura de PET (m)	0,70	0,35	1,20	–	1,47	–	0,80

As células com arranjos convencionais, preenchidas com brita e vazias com paredes de tijolos em crivo, foram construídas objetivando servirem de referência comparativa para as não convencionais preenchidas em parte com garrafas PET. Essas células convencionais destacam-se em relação às demais por apresentarem, respectivamente, índices de vazios superior (maior volume de acumulação) e inferior (menor volume de acumulação).

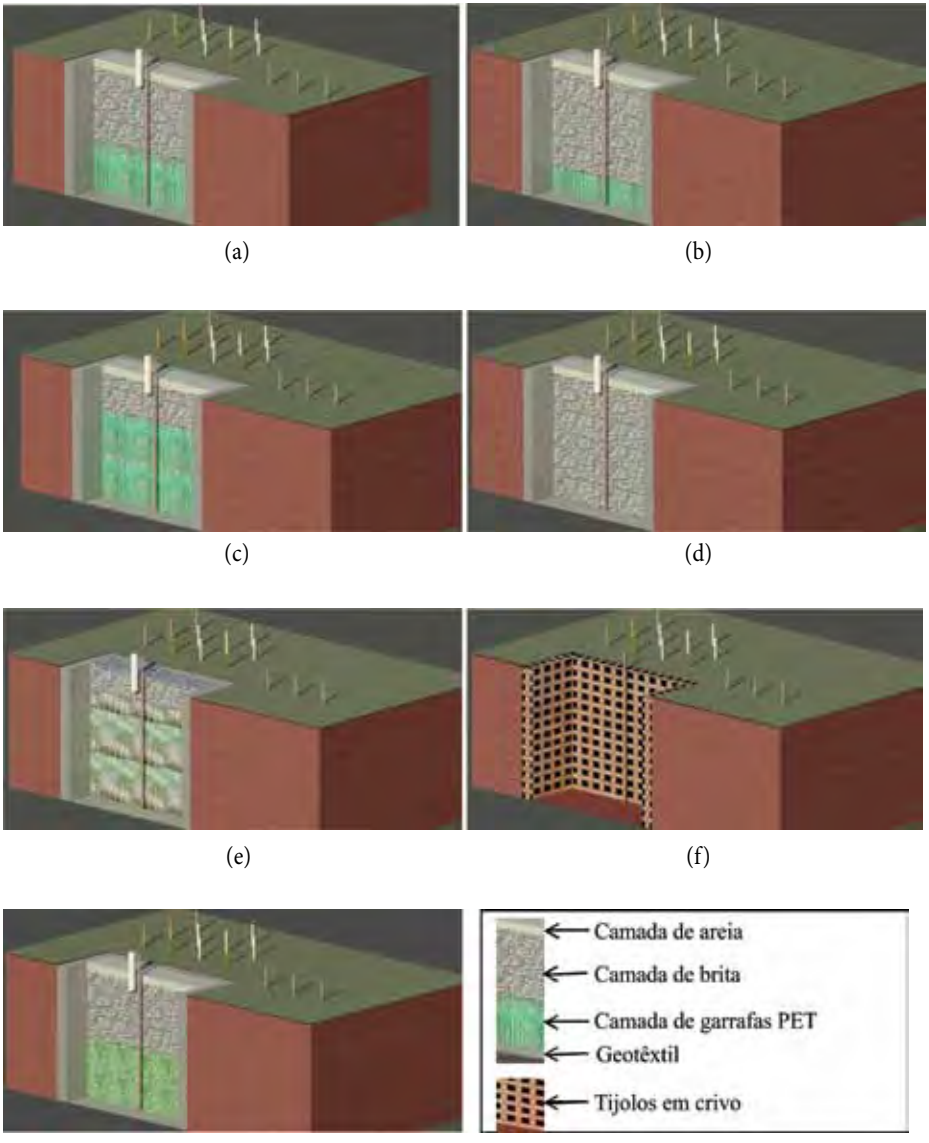


Figura 7. a) Trincheira 1; b) Trincheira 2; c) Trincheira 3; d) Trincheira 4; e) Trincheira 5; f) Trincheira 6; g) Trincheira 7.

Buscando monitorar adequadamente as trincheiras, de forma a obterem-se resultados de armazenamento, infiltração e comportamento da infiltração da água no solo, optou-se pela utilização dos seguintes instrumentos de controle: piezômetros tipo Casagrande, tensiômetros eletrônicos e com vacuômetro, sensor de nível para acompanhar o enchimento e esvaziamento dentro das trincheiras.

4.3 Monitoramento das trincheiras de infiltração

Com o objetivo de determinar a eficiência de cada trincheira, realizaram-se quatro etapas de ensaios de enchimento. Os ensaios seguiram um procedimento básico que consistiu em adicionar água, com a utilização de um caminhão pipa e duas caixas d'água de 1000 litros que serviam de transição, para o enchimento das trincheiras, monitorando o tempo de enchimento e de esvaziamento. Monitoraram-se o maciço e as trincheiras durante o procedimento com a utilização de tensiômetros (elétricos e vacuômetros), sensor de nível d'água, piezômetros e coleta de amostras de solo para determinação da umidade antes e após os enchimentos. Para a realização dessa atividade, foram necessários: 24 caminhões pipa contendo em média 11000 litros d'água cada. Em cada trincheira era usado por ensaio um caminhão de água.

A Figura 8 apresenta os resultados de enchimento e rebaixamento d'água dentro das trincheiras. Devido a problemas no sensor de nível d'água, não está sendo apresentada a primeira etapa de ensaio. Na primeira (1ª) parte dos gráficos (fase de enchimento), observou-se que em todas as trincheiras, com exceção da trincheira 4 (apenas brita), o enchimento total ocorreu nos 30 minutos iniciais de ensaio. Na segunda (2ª) parte do gráfico, fase em que a trincheira encontrava-se com água até sua altura máxima, cada trincheira apresentou um tempo distinto, mantendo o nível d'água máximo do enchimento. Essas diferenças, no intervalo de tempo se devem ao fato de que, como o volume de água de enchimento das trincheiras dependia do volume de vazios que as caracterizava e, portanto, do material de enchimento, a quantidade de água usada mantendo a trincheira cheia variou de trincheira para trincheira. A terceira (3ª) parte dos gráficos corresponde ao processo de rebaixamento do nível d'água nas trincheiras. Nesses gráficos, em princípio os intervalos de tempo referentes ao enchimento e esvaziamento deveriam ser proporcionais ao volume de vazios interno; no entanto, a disposição e a forma dos elementos internos interviram no fluxo.

Na busca de entender comparativamente o mecanismo de enchimento e rebaixamento de água nas trincheiras, foi necessário considerar as características da superfície de infiltração das trincheiras e a drenabilidade dos enchimentos. As garrafas PET cortadas/furadas/acopladas possuíam o volume interno totalmente comunicável com o externo por meio de seu topo e de seis furos em sua base, sendo cinco periféricos e um central. No entanto, o escoamento requer certo consumo de energia, ou seja, o rebaixamento fora das garrafas tende a ser mais rápido que através delas, por meio dos furos.

As PET's inteiras foram fechadas e dispostas verticalmente na trincheira, o que limitou o espaço preenchível com água ao existente entre elas. Foram completamente drenados funcionando como coluna de água diretamente aplicada ao solo com o mínimo de perda de energia.

As garrafas PET's amassadas foram fechadas, o que tornou o espaço interno isolado do contato com a água e limitou o enchimento ao espaço entre elas. A forma irregular entre as garrafas impossibilitou a determinação do volume de vazios entre elas. No caso dessa trincheira, é possível admitir que parte da água permaneça retida entre as garrafas PET, ao mesmo tempo em que a tortuosidade dos canais de fluxo termina por gerar algum retardamento no enchimento e na drenagem da água. As trincheiras com tijolos em crivo encontravam-se com a quase totalidade de seu volume disponível para enchimento.

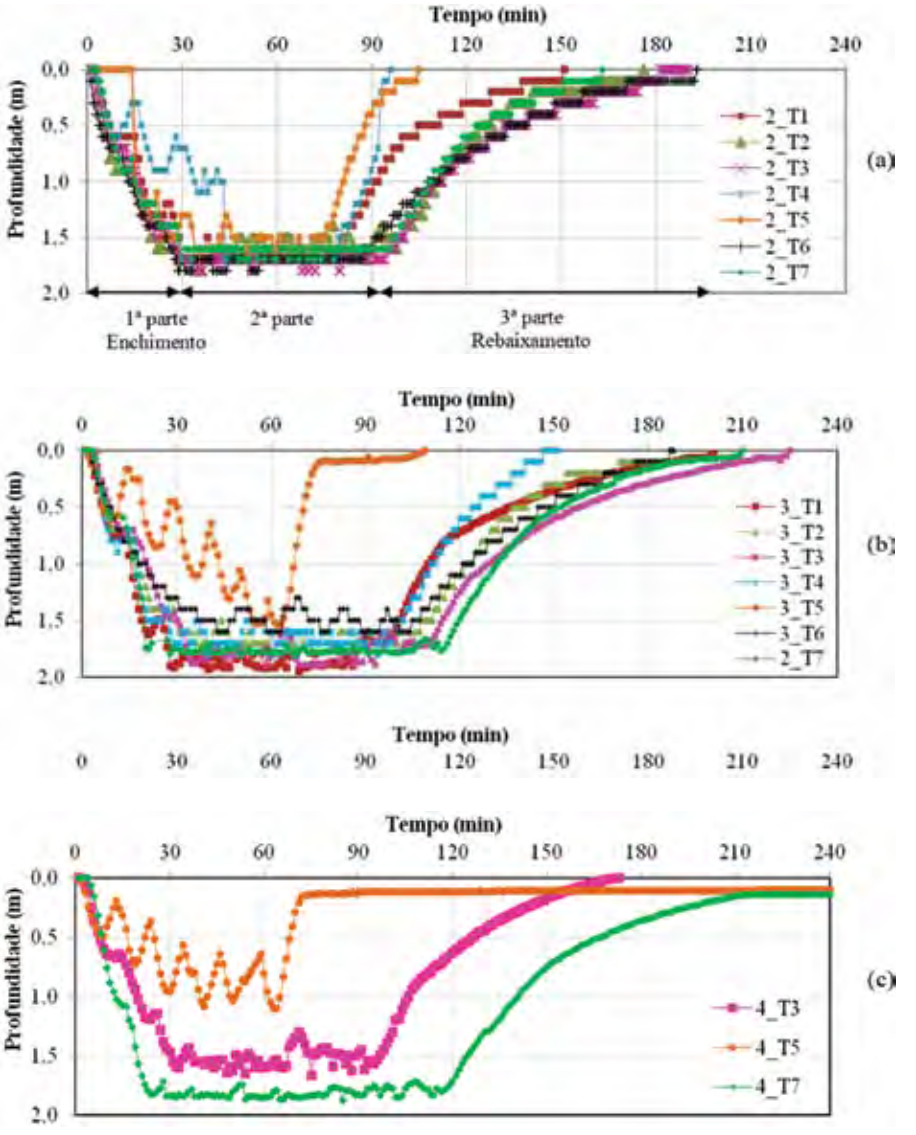


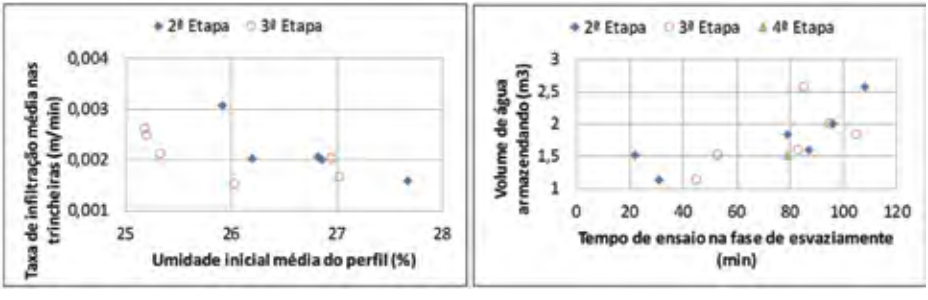
Figura 8. Sensor de nível: Profundidade x Tempo: a) 2ª etapa (Dez. 2010); b) 3ª etapa (Fev. 2011);

c) 4ª etapa (Jul. 2011).

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para a variação do nível d'água na trincheira T6 (tijolos em crivo) em função do tempo de esvaziamento. Os resultados mostram que, apesar de totalmente livre o interior da trincheira, exceto pelos tijolos em crivo, o esvaziamento não se dá linearmente com o tempo. Dentre outros fatores, esse comportamento pode estar ligado à diferença de permeabilidade entre a direção vertical e horizontal e ao fato de ser a carga hidráulica variável.

Figura 9. Variação do nível d'água em função do tempo de ensaio para o esvaziamento da trincheira T6.

A Figura 10a apresenta a taxa de infiltração calculada para as trincheiras em função das umidades médias dos perfis de solo antes dos ensaios de infiltração. Verifica-se, nestes resultados, que a taxa de infiltração tende a diminuir com o aumento da umidade média inicial do perfil. Verifica-se, ainda, que os valores obtidos encontram-se próximos aos valores obtidos por Restrepo *et al.* (2012) e apresentados no Capítulo 12 deste livro, indicando, assim, que os ensaios de infiltração em furos a trado constituem uma ferramenta a ser utilizada na previsão de taxas de infiltração em trincheiras. A Figura 10b mostra que o tempo de esvaziamento das trincheiras depende diretamente do volume de água nelas armazenado, sendo pouco afetado pelo tipo de enchimento nas condições utilizadas. Considerando-se apenas os esvaziamentos relativos às colunas dos materiais usados, obtiveram-se, respectivamente, na segunda e terceira etapas, valores médios para o rebaixamento na areia de 0,0049 m/min e 0,0037 m/min, na Brita 0,0049 m/min e 0,0032 m/min, nas garrafas PET 0,0040 m/min e 0,0044 m/min e nos tijolos em crivo 0,0036 m/min e 0,0046 m/min. Restrepo *et al.* (2012) encontraram, após a estabilização da taxa de infiltração em ensaios realizados em furos a trado em diferentes épocas do ano, em local próximo ao de implantação das trincheiras, valores de taxa de infiltração variando entre 0,0023 m/min e 0,0058 m/min, confirmando, assim, o potencial desse ensaio na previsão da taxa de infiltração por meio de trincheira.



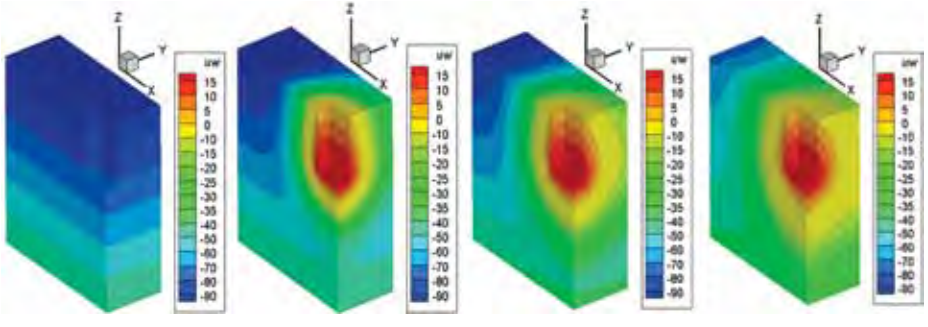
(a) (b)

Figura 10. a) Taxa de infiltração média nas trincheiras e b) tempo de esvaziamento das trincheiras.

Como a permeabilidade do solo é inferior à dos materiais utilizados, o maciço acaba comandando o fluxo, apesar de internamente haver variação de consumo de energia segundo o material utilizado.

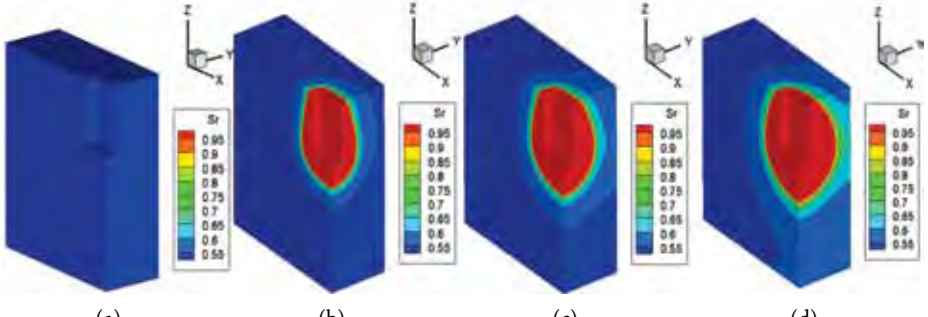
Destaca-se, também, que os resultados obtidos nas trincheiras confirmam a tendência de o solo apresentar redução na capacidade de infiltração com o aumento da umidade natural e, por consequência, redução da sucção matricial atuante no solo.

Camapum de Carvalho *et al.* (2007), ao analisarem a influência da forma do talude no rebaixamento do lençol freático e na umidade do maciço quando localizado acima do nível d'água, colocaram em evidência a importância da geometria do maciço para o fluxo. Dada a importância desse aspecto no caso da infiltração e como o monitoramento da frente de umedecimento e saturação apontava para resultados em relação ao menor lado distintos daqueles obtidos para o maior lado, decidiu-se por avaliar, por meio de simulação numérica preliminar como se propagava tridimensionalmente a frente de saturação do maciço a partir das trincheiras. As Figuras 11a, b, c e d mostram a forma como ocorre a redução da sucção à medida que se amplia o tempo de infiltração. Nas Figuras 12e, f, g e h, é mostrado o avanço da frente de saturação em função do tempo de infiltração. Os resultados deixam claro que tanto a zona onde ocorre redução da sucção como a que correspondente ao avanço da frente de saturação se ampliam de modo mais significativo, apesar da alta permeabilidade do solo, junto ao maior lado da trincheira. Esta conclusão é importante do ponto de vista prático, pois indica que, sempre que possível, o maior lado da trincheira deve voltar-se para o local onde o aumento de umidade do solo é menos preocupante.



(a) (b) (c) (d)

Figura 11. Poropressão: a) t = 0; b) t = 1 hora; c) t = 2 horas; d) t = 4 horas.



(a) (b) (c) (d)

Figura 12. Grau de saturação: a) t = 0; b) t = 1 hora; c) t = 2 horas; d) t = 4 horas.

5 Considerações finais

Os resultados apresentados neste capítulo não só mostram que as trincheiras constituem uma alternativa viável para resolver problemas ligados ao excesso de fluxo superficial oriundo de precipitações pluviométricas, como também indicam a possibilidade técnica de uso de garrafas PET nesses sistemas de infiltração. As trincheiras de infiltração, segundo Baptista *et al*. (2005), são bastante versáteis, podendo ser implantadas em passeios, estacionamentos, jardins, terrenos esportivos, áreas verdes ou ainda ao longo do sistema viário. Outra possibilidade interessante de implantação em grandes áreas consiste na combinação com outros sistemas de drenagem com bacias de retenção e detenção. As trincheiras podem ainda ser interligadas aos sistemas de drenagem convencionais para o caso de eventuais picos de precipitação a que não suportem.

Agradecimentos

Os Autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) o apoio dado ao desenvolvimento da pesquisa que serviu de base para a elaboração deste texto.

Referências bibliográficas

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S; CRES, F. N; ALFAKIH, E. (1994). Techniques alternatives em assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien et entretien. Paris: Lavoisier. 372 p.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. (2005). Técnicas compensatórias em drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH (Associação Brasileira de Recursos Hídricos). 266 p.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; SOUZA, V. C. B.; COSTA, L. S. G. M. (1998). Utilização de tecnologias compensatórias no projeto de um sistema de drenagem urbana. *In*: CONGRESSO NACIONAL DEL AGUA, 17., 1998, Santa Fe e SIMPOSIO DE RECURSOS HIDRICOS DEL CONOSUR, 2; 1998, Santa Fe. Santa Fe: Faculdad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional Del Litoral. v.2, p.248-257.

BRITO, D. S. (2006). Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem. Brasília: UnB. 117 fl. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação PTARH.DM-094/06.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GONZÁLEZ, Y. V.; SANTOS, M. A. A.; GITIRANA JR, G. (2007). Estabilidad de un talud cóncavo considerando condiciones en 3D. *In*: CONFERENCIA PANAMERICANA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA, 13, 16 a 20 de julho de 2007, Isla de Margarita. Isla de Margarita: SVDG e ISSMGE, p. 988-993.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C. (2010). Cartilha Infiltração. Brasília-DF: Faculdade de Tecnologia. Série Geotecnia, v. 2, 36 p.

CAMPOS, I. C. O.; GUIMARÃES, E. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. Proc. XIV COBRAMSEG, Búzios, RJ. p. 1535-1542.

COOMBES, P. J.; KUCZERA, G.; ARGUE, J. R.; COSGROVE, F., ARTHUR, D.; BRIDGMAM, H. D.; ENRIGHT, K. (1999). Design, monitoring and performance of the water sensite urban development at Figtree Place in Newcastle. *Proceedings of the* INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8, Sydney. p. 1319-1326.

GRACIOSA, M. C. P. (2005). Trincheiras de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica. São Carlos: USP. 231 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. (2008). Metodologia para o dimensionamento de trincheiras de infiltração para o controle do escoamento superficial na origem. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, v. 13, n. 2, p. 207-214.

LIMA, V. C. G. R. (2009). Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado. São Carlos: USP. 168 fl. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento, Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

PALMEIRA, E. M.; FANNIN, R .J. (2002). Soil-geotextile compatibility in filtration. Keynote *Proceeding of the* INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7, Nice, France v. 3, p. 853-872.

PARANHOS, H. (2002). Utilização de sucatas PET, entulho de obras e pneus como material drenante em obras de geotecnia e meio ambiente. Brasília, DF: Programa de Capacidade de Recursos Humanos para Atividade Estratégica, Universidade de Brasília. 69 p.

SILVA, J. P. (2007). Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração. Brasília: UnB. 155 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM – 154/07.

SILVA, J. P. (2012). Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos. Brasília: Brasília, DF: UnB, 211 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-074A/12.

SOUZA, V. C. B. (2002). Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial. Porto Alegre: UFRGS. 127 fl. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

URBONAS, B.; STAHRE, P. (1993). Stormwater. Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 447 p.

WEBSITES:

http://sustainablestormwater.org/2007/05/23/infiltration-trenches/. Acesso em: mar. 2010.

http://www.cob.org/services/environment/lake-whatcom/homeowner-incentive-program.aspx. Acesso em: jul. 2010.

http://ricecreekwatershed.govoffice2.com/index.asp?Type=B_BASIC&SEC=%7BA630EEFF-5862-4993-8D7B-4B95870921B4%7D&DE=%7B4FCEE6DE-FE3C-4213-9BA6-B46CBCFF2971%7D. Acesso em: jul. 2010.

Capítulo 19
Poços como estruturas de infiltração

Eufrosina Terezinha Leão Carvalho
José Camapum de Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Maurício Martins Sales
Jorge Tadeu Abrão

1 Introdução

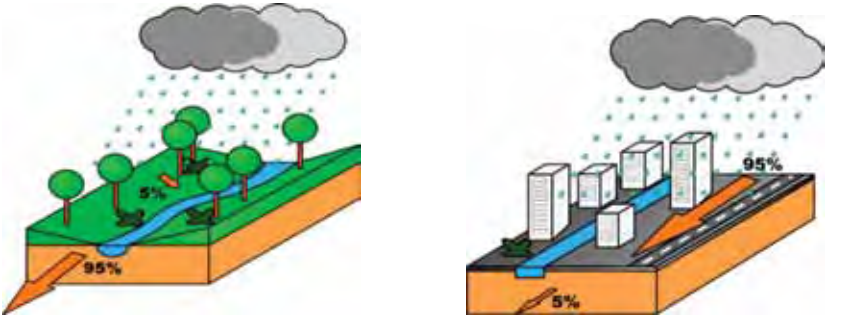
A partir das últimas quatro décadas, tem aumentado a preocupação mundial com a geração dos fluxos superficiais das áreas urbanizadas, principalmente nos centros urbanos das grandes cidades ou das cidades que tenham se desenvolvido ocupando as planícies de inundação. Os métodos de drenagem atualmente utilizados adotam um novo conceito que tem por princípio que o usuário urbano não deve ampliar a cheia natural (TUCCI, 2005), ao contrário dos métodos utilizados no passado que transferia o quanto antes os fluxos para jusante. De acordo com Bettes (1996), as práticas do passado ignoraram o efeito cumulativo dos fluxos, resultando em inundações nas partes à jusante de uma captação e em fluxos reduzidos dos cursos d'água em tempo de seca.

Esse novo conceito implica o uso de tecnologias com desenvolvimento de baixo impacto empregando técnicas de gestão em microescala de forma distribuída na área, com vários pontos de disposição final. Essas práticas, chamadas de Práticas Integradas de Gerenciamento (sigla em inglês IMPs), são utilizadas para alcançar as condições hidrológicas do pré-desenvolvimento da área a ser urbanizada (SOURTHEAST MICHIGAN COUNCIL OF GOVERNMENTS – SEMCOG, 2008). Assim, cada unidade ou parcela de ocupação do solo deverá gerenciar os fluxos produzidos em sua área, evitando transferir o problema para jusante.

Os cenários apresentados na Figura 1 relacionam a condição de urbanização de uma região com o regime de fluxos. Os fluxos superficiais numa bacia na condição natural podem atingir 5%, tendo-se, assim, um percentual de infiltração de 95%. No limite superior de ocupação de uma região, os fluxos superficiais podem atingir até 95% do volume precipitado.

O controle de águas pluviais na origem consiste em um conjunto de soluções técnicas e de procedimentos, a montante do sistema físico. Esse controle é feito nas unidades individuais ou coletivas de uma localidade e tem como principal objetivo melhorar a infiltração de águas pluviais, propiciando a recarga dos aquíferos e reduzindo a amplitude das vazões de pico em áreas passíveis de alagamento e inundação. Ao reduzirem o fluxo superficial, esses sistemas contribuem ainda para reduzir a possibilidade de erosão hídrica pluvial, inclusive a dos canais de drenagem naturais. Dessa forma, procura-se reduzir o impacto das águas pluviais no sistema coletor público. Essa é uma alternativa sustentável que procura evitar a construção de coletores e emissários cada vez mais extensos, de diâmetros maiores e com elevado custo

de implantação para a administração pública. Cabe salientar, ainda, que a implantação de qualquer que seja o sistema de infiltração deve passar por analises criteriosas prévias de engenharia para avaliar os riscos, como os de erosão interna, colapso estrutural do solo e perda da capacidade de suporte.



(a) (b)

Figura 1. Cenários da ocupação do solo *versus* infiltração dos fluxos precipitados (modificado de SCHUELER, 1987).

São muitas as medidas de controle local dos fluxos que favorecem a redução no porte dos sistemas de drenagem convencionais. Esse tipo de abordagem para o problema de drenagem urbana vem sendo de interesse dos profissionais de engenharia que atuam nos ramos de hidrologia, hidráulica e geotecnia. Além de ligado a outras áreas do conhecimento, como geologia e geografia, o tema tem despertado interesse de ambientalistas, aplicadores do direito, educadores e, em especial, dos tomadores de decisão nas esferas municipais, estaduais, federal e do próprio setor privado.

No Brasil, é importante destacar que técnicas alternativas para o controle das enchentes na origem têm sido pouco empregadas. Nos poucos casos em que são empregadas, tais estruturas de infiltração ainda são dimensionadas sem critérios técnicos. Em Goiânia, por exemplo, a porcentagem de área permeável exigida pelo código de edificações pode ser substituída, em parte, por dispositivos de infiltração, como os poços de infiltração. Tais poços, no entanto, possuem dimensões padronizadas e não é exigido qualquer estudo prévio dos parâmetros locais para projeto. Essa prática tem sido muito utilizada em edifícios residenciais, para atender à taxa de infiltração exigida.

Finalmente, é preciso que se entenda que enquanto o efeito de um poço, ou outro sistema único, tem pouca influência à jusante, o efeito cumulativo de vários pode ser significativo, evitando ou mitigando problemas como alagamentos, inundações e erosões.

2 Estruturas utilizadas para o controle na fonte da drenagem urbana

Em todo o mundo vários pesquisadores têm realizado estudos sobre sistemas de infiltração, mas em cada região a situação é específica em relação à hidrologia, à climatologia, às condições do solo e à sua ocupação e uso. Os sistemas de infiltração representam uma alternativa capaz de contrapor o efeito da impermeabilização das áreas urbanizadas. Esses sistemas são

capazes de fazer o amortecimento e armazenar o volume excedente nos picos de precipitação, proporcionando em seguida a infiltração das águas pluviais no solo, além de propiciar a recarga do lençol freático. Existem ainda os sistemas utilizados para armazenamento com uso previsto para outros fins.

Embora o foco das discussões aqui sejam os poços, podem ser utilizadas também outras soluções de controle de fluxo superficial na fonte, que evitem problemas como alagamentos, inundações e erosões tais como: trincheiras, valas, colchões de drenagem, bacias de retenção e detenção e pavimentos drenantes, além da combinação de dois ou mais desses sistemas, de modo a transferir a água precipitada na superfície para o subsolo com o mesmo nível de acumulação e distribuição do fluxo que ocorria naturalmente.

Embora as estruturas de infiltração colaborem com o controle da drenagem urbana na fonte, seu uso apresenta vantagens e desvantagens. Como vantagens podem ser enumeradas:

a) diminuição das cheias, pela redução dos caudais e volumes à jusante;
b) promoção da infiltração, reduzindo a necessidade de ampliação das redes existentes ou de novas redes de drenagem no sistema convencional;
c) descentralização do sistema de drenagem pluvial;
d) melhoria na qualidade dos corpos hídricos, ou seja, domeio receptor;
e) aumento da recarga do lençol freático;
f) valorização da paisagem urbana quando implantados em zonas de múltiplo uso através dos espelhos d'água, bacias de retenção ou detenção, entre outros;
g) redução da propagação de poluentes e materiais sólidos. O controle na fonte pode diminuir a concentração de poluentes ou tornar possível alguma forma de tratamento individual mais simples e eficiente, buscando sempre o controle e o desenvolvimento sustentável.

Como desvantagens ou limitação de uso, podem ser enumeradas:

a) a necessidade de planejamento antecipado para o uso da técnica em áreas de dimensões consideráveis, pois a ocupação de espaço constitui uma das desvantagens do sistema de controle na fonte;
b) preocupação com a manutenção do sistema para manter sua eficiência e vida útil;
c) interferência em estruturas vizinhas devido à percolação de água no solo;
d) risco de contaminação do lençol freático;
e) risco de erosão interna capaz de provocar subsidências de grandes dimensões.

Os dispositivos de controle na fonte podem armazenar ou armazenar e infiltrar as águas pluviais. Quando a finalidade do dispositivo é infiltrar a água no solo, a falta de dados geotécnicos mais precisos tem levado os projetistas a proporem estruturas com elevados coeficientes de segurança, onerando os projetos e ocupando áreas que poderiam ser destinadas a outros fins.

Para maximizar os benefícios dessa metodologia, é necessária a integração de especialistas para a implantação do sistema visando atender ao meio ambiente e compatibilizar com as redes existentes. É importante o uso de técnicas que tornem o sistema eficiente, de baixo custo na implantação, fácil execução e manutenção, aliado à educação ambiental nos âmbitos formal e não formal, para motivar a participação do cidadão, conscientizando-o de que a responsabilidade não é somente do Poder Público.

São fatores que influenciam na escolha dos sistemas para controle das águas pluviais urbanas:

a) integração ao plano diretor urbanístico;
b) aplicabilidade ao uso do solo;
c) quantidade e qualidade do escoamento superficial;
d) integração estética ao paisagismo local e compatibilidade com o projeto arquitetônico;
e) proximidade em relação à fonte;
f) possibilidade de manutenção regular do sistema;
g) possibilidade de usos múltiplos da área. Um campo de futebol, por exemplo, pode ser construído de forma a possibilitar seu uso como reservatório de detenção, seguido de infiltração da água nos eventos de chuva;
h) fatores locais, como tipo de solo, profundidade do nível d'água, riscos de instabilidade do perfil e riscos de colapso diante da condição de elevada umidade;
i) custo de implantação do sistema.

3 Conceitos gerais sobre o projeto de poços de infiltração

Os poços de infiltração são sistemas pontuais, cuja profundidade depende do perfil de solo e nível do lençol freático.

A camada superficial de solo sofre variações sazonais de umidade em função da distribuição desigual das chuvas. Na região do Cerrado brasileiro, essa "zona ativa" encontra-se nos primeiros 2 a 3m. A execução de sistemas de infiltração como poços ou outros nas camadas do solo tendem a interferir menos na estrutura desse solo, pois o mesmo já está "preparado" para variações de umidade que os sistemas de infiltração provocarão. A execução de sistemas de infiltração mais profundos requer estudos mais detalhados.

Os poços permitem o armazenamento e a infiltração de certo volume de água no solo. A Figura 2 ilustra um sistema de poços de infiltração. Um sistema de poços completo para ser instalado em subsolo de edifício tem as características descritas a seguir.

a) Revestimento da parede e do fundo com manta de geotêxtil que atuará como filtro nos dois sentidos, localizada na interface entre o solo e o revestimento do poço. No caso de poços não revestidos e preenchidos com material drenante, como brita, o geotêxtil atuará na interface entre este e o solo, passando a ter também a função de auxiliar na distribuição do fluxo.
b) Revestimento em tubos de concreto pré-moldados e perfurados ou tijolos assentados em crivo ou mesmo o uso de pneus usados que são indicados para utilização em lotes com construções de poucos poços, pois é um sistema de fácil execução e a técnica é de domínio popular. O poço pode ainda não ser revestido, caso em que se recomenda o seu preenchimento com material de elevada capacidade de armazenamento e drenagem. Já existem no mercado produtos manufaturados com índice de vazio superior a 97%, confeccionado com material de polipropileno, não nocivo ao meio ambiente, de alta resistência mecânica e resistente a ataques químicos do solo. De acordo com o fabricante, esses produtos podem ser oferecidos em sete padrões de capacidade de carga diferentes ou sob encomenda para a carga necessária. De qualquer forma, é recomendável a pré-filtragem da água de modo a evitar a colmatação do material de enchimento do poço ou a funcionalidade do sistema.

c) Para os poços revestidos deve ser colocada uma camada de material granular colocada no fundo do poço.
d) Afastamento e cota inferior de assentamento do poço devem preservar a integridade das estruturas de edifícios vizinhos, principalmente arrimos e fundações, levando em conta as condições de fuste e sua base e a área de influência da infiltração.
e) Conjunto moto-bomba para recalque do excedente e um sistema extravasor que entra em ação em eventual falha do sistema de moto-bomba. Sempre que possível, deve ser previsto o sistema extravasor atuando por gravidade e lançando o volume excedente no sistema de drenagem convencional por meio de um coletor ligado ao sistema de águas pluviais da rede pública.
f) Sistema de boia com acionamento automático, para nível crítico, próximo ao enchimento do poço, permitindo o encaminhamento dos fluxos por meio de um sistema *by-pass*.
g) Finalmente deve ser instalado um dispositivo de visita para manutenção e inspeção.

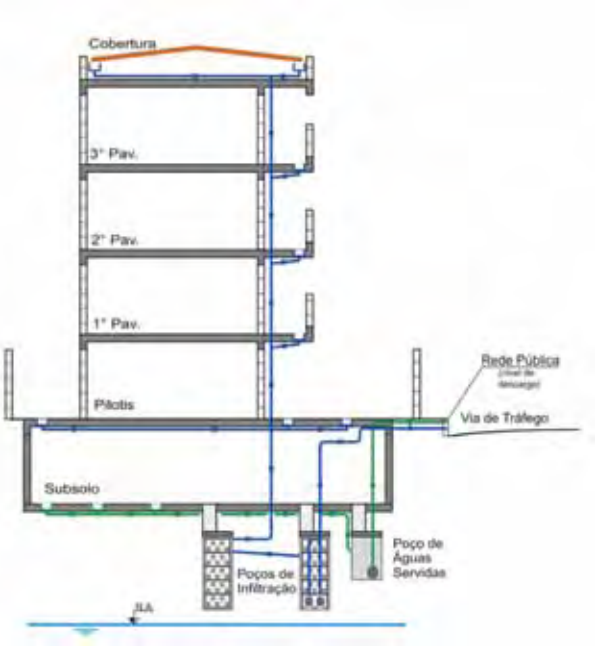


Figura 2. Modelo de poço de infiltração instalado em subsolo de edifício

Numa situação mais simples, dependendo do tipo de solo, numa residência, por exemplo, um único poço pode ser suficiente para infiltrar o volume de água oriundo das precipitações que incidem sobre o lote, considerando-se a área impermeabilizada e o excedente da infiltração nas áreas preservadas ou vegetadas, dependendo, obviamente, da capacidade de infiltração do solo local. A Figura 3 apresenta um sistema simples de infiltração previsto para um lote onde os fluxos excedentes são encaminhados para a via ou rede pública por gravidade por meio de um coletor no sistema convencional. Nesse caso, é necessária apenas a inclusão de uma caixa de pré-tratamento com coleta dos resíduos.

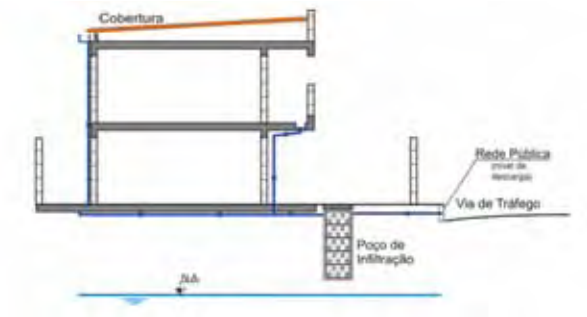


Figura 3. Drenagem na fonte por poços de infiltração.

A Figura 4 mostra um croqui com a instalação de uma bateria de poços de infiltração interligados para infiltrar as águas de chuva coletadas do telhado e das superfícies impermeabilizadas de edificações isoladas ou contíguas. De acordo com esse sistema, os fluxos coletados dos telhados e pavimentos são encaminhados para uma série de poços interligados por trincheiras, ambos infiltrantes. É importante observar que as águas mais suscetíveis à contaminação, como água de lavagem de piso de garagem, devem ser encaminhadas para um poço de água servida que será bombeada para fora dos limites da edificação e não infiltrada no solo. O mesmo cuidado deverá ser dispensado aos demais fluxos das áreas impermeabilizadas como pátios e sacadas. Se esses fluxos forem considerados pelo projetista como de alto risco para contaminação do solo e lençol freático, devem ser direcionados para um poço de água servida ou deve ser adotado algum pré-tratamento antes de ser encaminhados para os poços de infiltração.

A trincheira é composta por material drenante que, ao mesmo tempo, faz a adução dos fluxos de um poço para o outro e promove a infiltração no solo. Os fluxos encaminhados ao corpo d'água à jusante ficam bastante reduzidos e o abastecimento do lençol freático fica garantido. A Figura 4 apresenta um sistema esquemático de projeto adotando essa concepção, o que pode reduzir consideravelmente o volume de lançamento à jusante. A Figura 5 apresenta o corte AA na Figura 4, detalhando o sistema integrado de poços e trincheiras de infiltração. Alguns cuidados devem ser tomados para que não haja interferência da água nos pavimentos, seja por acumulação ou ascensão capilar.

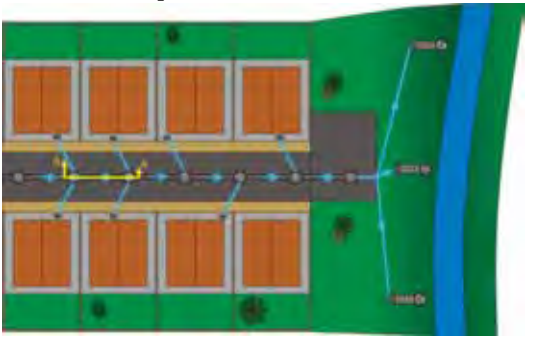


Figura 4. *Layout* de um sistema de infiltração composto por poços e trincheiras instalados em condomínio horizontal.

Figura 5. Corte AA com detalhe de poços e trincheiras.

4 Fatores que influenciam o processo de infiltração

Em outros capítulos deste livro, são tratados os fatores que influenciam a capacidade de infiltração do solo, tais como: o próprio solo e seu grau de intemperismo, cobertura vegetal, relevo, clima e topografia. A caracterização do perfil de solo e uma série de análises precisam ser desenvolvidas para entender o processo de infiltração da água no solo. Também devem ser considerados os parâmetros do solo, a geometria do poço de infiltração, as condições de contorno e as condições iniciais.

As propriedades hidráulicas do solo são determinadas pela condutividade hidráulica e curva característica do solo. A condutividade hidráulica determina a capacidade de transmitir água e a curva característica determina a capacidade de armazenar água no solo, mas também o seu potencial de atuação como energia de fluxo. Durante o processo de perda de umidade e redução do grau de saturação, pode ocorrer também a retração dos poros, diminuindo a condutividade hidráulica ou a permeabilidade do solo.

Os principais fatores que geram a perda da capacidade de fluxo da água no solo preservando-se sua porosidade inicial são:

a) área total para o fluxo da água decresce com a diminuição da quantidade de poros cheios de água, porque o ar passa a obstruir o caminho de percolação;
b) o esvaziamento dos poros avança dos maiores para os menores, acarretando uma diminuição da condutividade hidráulica porque o fluxo da água, segundo a equação de Poiseulille para fluxos laminares em tubos capilares, é diretamente proporcional ao quadrado do raio do tubo;
c) a viscosidade e densidade são propriedades dependentes da temperatura e as variações térmicas do fluido podem ampliar ou reduzir a capacidade de fluxo dependendo do sentido em que ocorrem e da temperatura inicial do fluido;

Com o enchimento dos poros de ar, aumenta a quantidade de água que fica isolada e descontínua em diversos poros do solo, dificultando o fluxo da água como líquido.

Apesar de possuírem maior capacidade de armazenamento de água, solos argilosos possuem baixa capacidade de infiltração. No entanto, a granulometria de solos tropicais individualizando-se as partículas (análises granulométricas com desagregação das partículas), muitas vezes, não reflete seu comportamento, sendo necessária a avaliação de outras

propriedades e considerando-se a textura do solo em estado natural, não desagregados. O intemperismo de solos argilosos, caracterizados pela presença de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio que atuam agregando as partículas de argilas, pode, ao gerar macroporos, aumentar a capacidade de infiltração de um solo argiloso até níveis de infiltração típicos de areias. Portanto, para as condições brasileiras, a estrutura do solo pode exercer influência muito mais expressiva na taxa de infiltração do que a textura como partículas isoladas. Nos solos tropicais, a distribuição de poros é responsável pela forma como se dá o armazenamento de água em seu interior.

Para as areias com boa condutividade hidráulica em estado saturado, o deslocamento da frente de umedecimento pode ser retardado em função de sua baixa condutividade hidráulica sob condições não saturadas (PRUSKI *et al*., 1997, citados por BRANDÃO, SILVA e PRUSKI,2004). A respeito da capacidade de armazenamento de água no solo, estão envolvidas a porosidade, a profundidade e a quantidade de água antecedente. Por sua vez, a porosidade depende de fatores como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, dentre outros.

A penetração da água no solo pode ser prejudicada pelo deslocamento, pelo rearranjo e pela orientação das partículas de solo, provocando entupimento dos poros ou mudança na direção preferencial do fluxo. Outro fator importante é o intemperismo predominantemente nas camadas superiores do perfil, além da formação de crostas superficiais no solo pelo impacto das gotas de água de chuva que cai na superfície, principalmente naquelas desprotegidas. CIDERGREN (1977) comenta que o arranjo das partículas do solo pode influenciar a permeabilidade de dois modos importantes: pela ordenação ou estratificação das partículas ou pela orientação das partículas. A orientação das partículas e mesmo a compactação do solo podem ocorrer devido a ciclos de molhagem e secagem.

Segundo Freeze e Cherry (1979), para descrever a natureza da condutividade hidráulica numa formação geológica, é necessário conhecer sua heterogeneidade e anisotropia. Uma causa primária de anisotropia numa pequena escala é a orientação dos minerais de argila em rochas sedimentares e sedimentos não consolidados. As permeabilidades, vertical e horizontal, do solo são bastante sensíveis à compactação e ao processo de adensamento. A compactação de uma camada para uma construção pode reduzir sensivelmente a permeabilidade vertical e ampliar a horizontal. O estado agregado em que se encontram os solos tropicais profundamente intemperizados os conduz a um modelo de comportamento hidráulico que tende a ser mais isotrópico, embora as condições de formação e lixiviação naturais possam contribuir para a ocorrência de anisotropia.

A cobertura vegetal pode favorecer a infiltração da água no solo. Algumas vegetações possuem sistema radicular que melhor favorece a absorção da água através das raízes. Bharati *et al*. (2002) e Fuentes *et al.* (2004), citados por Sourtheast Michigan Council of Governments – SEMCOG (2008), comentam que a preservação da vegetação natural do local pode aumentar em até dez vezes a capacidade de infiltração da área, mesmo que o solo seja argiloso. No entanto, um manejo bem efetuado dos solos também tende a melhorar a sua capacidade de infiltração.

Segundo Horton (1933) *apud* Beven (2004), enquanto a temperatura é certamente um fator, aspectos biológicos são a causa principal do ciclo sazonal da capacidade de infiltração. No caso de solos cultivados, há um aumento marcante na capacidade de infiltração imediatamente após o plantio. Isso pode ocorrer por dois motivos: aumento da porosidade do solo e perda de

umidade, aumentando a sucção e sua capacidade de armazenamento. Uma elevação marcante na capacidade de infiltração também acontece na estação da primavera, quando animais da fauna terrestre ficam ativos. Uma diminuição marcante de capacidade de infiltração acontece no outono, tempo em que a fauna fica dormente. Essas duas causas enumeradas são os principais fatores para a formação de macroporos em determinadas estações do ano.

5 Ensaios de laboratório e campo para projeto de poços de infiltração

Os parâmetros do solo para a determinação da taxa de infiltração e caracterização do perfil são obtidos por meio dos ensaios de laboratório e de campo. A Tabela 1 apresenta um sumário das investigações geotécnicas recomendadas.

Tabela 1. Principais ensaios de campo e laboratório para identificar parâmetros do perfil de solo envolvidos na infiltração.

Ensaios de Laboratório	Norma ABNT	Parâmetros obtidos	Observações importantes
Abertura de poços e trincheiras de inspeção em solos	NBR 9604/86	Identificação tátil visual do perfil e retirada de amostras deformadas e indeformadas.	A retirada das amostras deve ser preferencialmente no poço em que serão feitos ensaios de infiltração e permeabilidade.
Granulometria com defloculante e sem defloculante	NBR 7181/84	Curva granulométrica com avaliação de D10, Cue Cc.	O ensaio de granulometria com e sem defloculante para identificar o grau de intemperismo do solo perfil de solo. O intemperismo tende a favorecer a infiltração.
Limites de Atterberg	NBR 7180/81 e 6459/84	w_L, w_P, IP e caracterização	Classificação do solo
Peso específico dos sólidos	NBR 6508/84	γ_s	Parâmetro necessário à avaliação da porosidade e no ensaio de sedimentação
Curva característica de retenção de água (CCRW)	Borges (2010) e Bullut (2007)	Distribuição de poros; energia disponível auxiliar na infiltração	A CCRW constitui-se em ferramenta auxiliar importante na avaliação do potencial de infiltração e na avaliação de riscos como o de colapso estrutural do solo por aumento de umidade.
Umidade em campo	NBR 6457/86	w	Determinação do perfil de umidade
Permeabilidade saturada	14545/2000 – Solos argilosos e 13292/1995 – Solos arenosos	Ks	A permeabilidade saturada é propriedade do solo que causa maior impacto no desempenho dos poços de infiltração.
Ensaio oedométrico	MB 3336 e NBR 12007 CB-2 1990	Compressibilidade, Tensão de pré-adensamento, Colapsividade e Expansão	Permite a determinação da infiltrabilidade e permeabilidade do perfil de solo.

(continuação)

Ensaios de Campo	Norma ABNT	Parâmetros obtidos	Observações importantes
Ensaio de Sondagem	NBR - 0684/2001	Identificação tátil visual do perfil de solo e identificação do nível do lençol freático.	Permite teste de permeabilidade e infiltrabilidade em furo, monitoramento do nível do lençol freático, determinante da profundidade segura dos sistemas de infiltração.
Ensaio de infiltração em poço	ABGE (1996) - Boletim IV.	Permeabilidade e infiltrabilidade do perfil	Permite a determinação da infiltrabilidade e permeabilidade do perfil de solo.
Ensaio de Infiltrômetro de anéis concêntricos	ASTM D5093 02(2008)	Infiltrabilidade de superfície	Avalia a infiltrabilidade do solo em superfície.

Os resultados dos ensaios de laboratório são indispensáveis na interpretação dos resultados de infiltrabilidade em campo.

Na retirada de amostras para os ensaios de laboratório, recomenda-se que as amostras de solo, deformadas e indeformadas, sejam obtidas durante a escavação do próprio poço que será utilizado para o ensaio de infiltração e permeabilidade do solo.

A Figura 6 apresenta um exemplo de resultados de análises da granulometria de um perfil de solo tropical de Goiânia. O perfil analisado está localizado na região Sudoeste da cidade e foi estudado por Leão Carvalho (2011). Como é típico de muitos solos do Centro-Oeste, tem-se um perfil bastante uniforme e com maior estruturação na profundidade de 0,5m. O solo mais superficial é mais intemperizado, característica de solo submetido a grandes variações de umidade e temperatura.

O grau de intemperismo do solo, mostrado na Figura 6, influencia diretamente na sua estrutura. Agentes cimentantes que agregam as partículas do solo alteram seu comportamento com o surgimento de uma macrotextura. Essa alteração é observada na sua composição granulométrica ao se compararem os resultados dos ensaios sem defloculante aos com defloculante.

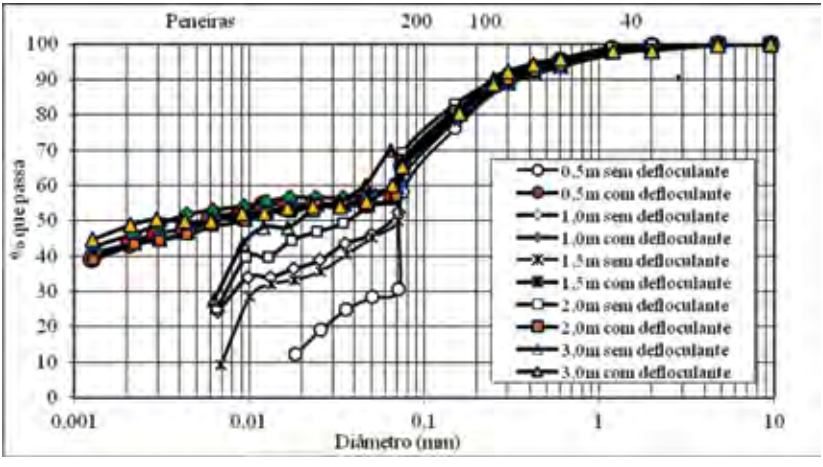


Figura 6. Resultado da granulometria do solo até 3,0m de profundidade com registro a cada 0,5m. Granulometria com e sem defloculante (LEÃO CARVALHO, 2011).

O perfil de umidade do solo deve ser determinado durante a perfuração do poço para o ensaio de campo e a coleta de amostras para ensaios de laboratório. A Figura 7 apresenta um exemplo de perfil de umidade de solo, medido por Leão Carvalho *et al.* (2011), resultado preliminar do campo experimental II aplicado a um projeto de controle de águas urbanas instalado no local em 2010. Como pode ser observada na figura, a umidade do perfil de solo varia ao longo do ano e, com ela, a capacidade de armazenamento do maciço e a sucção inicial interveniente no processo de infiltração.

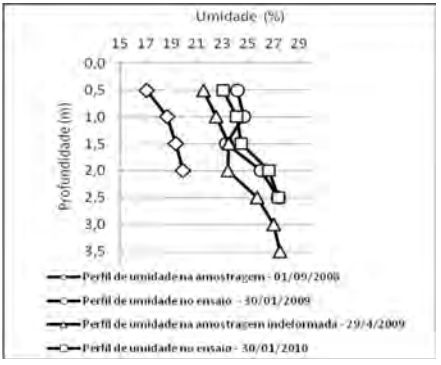


Figura 7. Perfil de umidade do solo no campo experimental II de Leão Carvalho *et al.*(2011).

A verificação da profundidade do lençol freático ao longo das estações do ano é importante para identificar sua variação e conhecimento do nível d'água máximo esperado. Tal medição pode ser realizada com piezômetro construído a partir de um furo de sondagem. A identificação do nível máximo do lençol é condição determinante para estabelecer a profundidade adequada do sistema de infiltração. Embora não apresente nenhum estudo nem leve em conta características do solo (se argiloso, arenoso ou pedregulhoso), a Norma Técnica de Esgoto Sanitário, NBR 13.969 (ABNT, 1997), recomenda que as bases de sumidouros e valas estejam no mínimo a 1,5 m do nível máximo do lençol freático condição que geralmente é aplicada aos sistemas de infiltração. Estudos como esses que requerem certo prazo de execução devem ser previstos com antecedência. O ideal é serem realizados por ocasião da elaboração do plano urbanístico ou como requisito de aprovação de uso de determinada área para fins de loteamento.

5.1 Ensaios de campo

A permeabilidade de um solo pode ser obtida em laboratório ou por meio dos ensaios de campo. A determinação da permeabilidade do solo por meio de ensaios de campo é geralmente realizada em condições menos controladas do que os ensaios de laboratório, porém em situação de contorno mais realista. O ensaio de campo é realizado sob condições do solo *in situ*, levando em conta suas características geológicas e a sazonalidade, que é fator determinante dos resultados. Fatores como perturbação do solo por amostragem e baixa representatividade do perfil pelo tamanho reduzido de corpos-de-prova são amenizados ao se fazerem ensaios em campo.

Dentre os ensaios de campo, pode-se citar: ensaio de poço de pequeno e grande diâmetro para avaliar o perfil de infiltrabilidade local e ensaio de infiltrômetro de duplo anel ou anéis concêntricos para avaliar a infiltrabilidade superficial do maciço. Os primeiros são aplicados na avaliação da capacidade de infiltração do perfil do solo, aplicando-se a poços e trincheiras de infiltração. O último permite avaliar a infiltrabilidade superficial do maciço, aplicando-se a projetos como os de valas, bacias de infiltração, colchões drenantes e pavimentos drenantes. Ele pode ser também usado para avaliar a infiltrabilidade de bases de poços e trincheiras de infiltração

5.2 Ensaio em poço

A literatura recomenda que os testes de infiltração em campo sejam realizados, sempre que possível, em poço em escala real e sejam ensaiados no mínimo duas vezes, de preferência no mesmo dia. Recomenda também que o enchimento do poço para cada ensaio seja sempre na mesma cota, ou seja, mesma carga hidráulica. Essa recomendação se deve ao fato de que o efeito de arco interfere tanto no fluxo como na compressão junto à face do maciço após a escavação.

Alguns cuidados devem ser adotados durante a escavação do poço em campo, dentre os quais se destacam:

a) garantir o alinhamento com a vertical;
b) identificar se há, ao longo das paredes do poço e no seu fundo, a presença de perfuração lateral que possa provocar a fuga da água e falsear o ensaio de infiltração em perfil;
c) identificar se houve, durante o processo de escavação dos poços, a formação de colmatação superficial devido ao contato da ferramenta de corte com o solo. O fenômeno da colmatação é comum em solos com teor elevado de argila. Se isso acontecer, deve ser feita uma escarificação manualmente na superfície das paredes e no fundo do poço.

Ensaios de infiltração devem ser realizados com o enchimento do poço utilizando uma vazão de água que garanta o seu rápido enchimento. Geralmente, utiliza-se um caminhão pipa ou reservatório com volume e vazão adequados. O teste deve ser realizado pelo menos duas vezes seguidas e de preferência no mesmo dia. Para a realização do ensaio de campo, devem ser adotados os seguintes procedimentos:

a) verificar as medidas da escavação: diâmetro e profundidade;
b) abastecer e esvaziar o poço no mínimo duas vezes, tentando simular a estação chuvosa que corresponde às menores taxas de infiltração, momento em que o sistema de infiltração é solicitado;
c) adotar um sistema apropriado para avaliar o rebaixamento do nível da água no poço (utilizando trena, sensor de nível d'água ou outro) e considerar o mesmo referencial e variação de tempo para cada ensaio;
d) não direcionar a mangueira para as paredes do poço, para evitar riscos de perda de resistência e erosão do solo;
e) a realização de teste com o poço completamente cheio não é necessário nos casos de sistemas de infiltração onde a camada de maior infiltração se encontra nas camadas

inferiores, como é o caso de perfil com a presença de lente de cascalho ou areia. Nesses casos, deve-se avaliar se a matriz grossa desse material é filtro da fina; caso contrário, pode dar origem a processo de erosão interna, subsidências e mesmo colmatação parcial dos poros a longo prazo, devido ao deslocamento de partículas menores.

A interpretação dos resultados de campo deve ser acompanhada de testes de laboratório que caracterizem o perfil de solo e ensaios especiais no caso de solos problemáticos, como os solos colapsáveis.

5.3 Interpretação de ensaios de infiltração em poço

A ABGE (1996) sugere um método de interpretação do rebaixamento do nível d'água nas estruturas tipo poços de infiltração com geometria semelhante à apresentada na Figura 8. O poço de infiltração é representado por um tubo cilíndrico de raio *r*, altura *h* da lâmina d'água na estrutura, e o rebaixamento da lâmina d'água, Δh, em um intervalo de tempo igual a Δt para um nível de lençol freático conhecido.

A partir da Figura 8, a determinação da permeabilidade *k* é feita de acordo com a Equação 1:

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta h} \times \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (1)$$

em que: R é o raio de influência considerada uma distância hipotética que, simplificadamente, representaria a zona do solo que receberia o volume infiltrado, escoamento que se faz do centro do furo para a lateral ao longo da profundidade do poço. Esse raio de influência pode ser estimado conhecendo-se a porosidade do solo e o volume de água máximo a ser infiltrado.

A relação entre *R* e *h* é dada pela equação a seguir:

$$R^2 + R - h = 0 \quad (2)$$

Segundo Rodio (1960) *apud* Boletim da ABGE (1996) a equação evidencia que quanto menor for o rebaixamento, menor será a variação de *R* e mais válida será a aplicação da Equação 2.

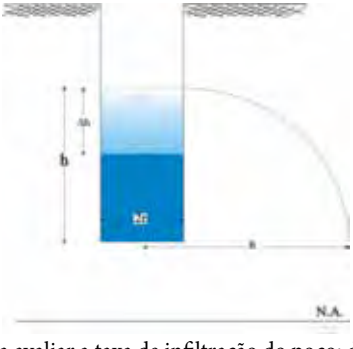


Figura 8. Modelos adotados para avaliar a taxa de infiltração do poço: detalhamento do poço de ensaio para determinação da taxa de infiltração (ABGE, 1996).

Os resultados dos ensaios de infiltração em poço podem ser utilizados para o cálculo da "taxa de infiltração". Num intervalo de tempo qualquer, à medida que a água infiltra, o nível d'água no poço abaixa e a área disponível para infiltração reduz. A Equação 3 e a Figura 9 mostram como calcular a área de infiltração que varia a cada instante com a redução de h e aumento de $Z_{médio}$, sendo:

$$Z_{médio} = (Z_1 + Z_2)/2 \quad (3)$$

onde: Z_1= é a altura de secagem num tempo inicial; Z_2= é a altura de secagem em um tempo final.

A área de infiltração corresponde à área das paredes verticais das estruturas mais a área do fundo, de acordo com a Equação 4 a seguir:

$$A = 2\pi \cdot r\,(H - Z_{méd}) + \pi r^2 \quad (4)$$

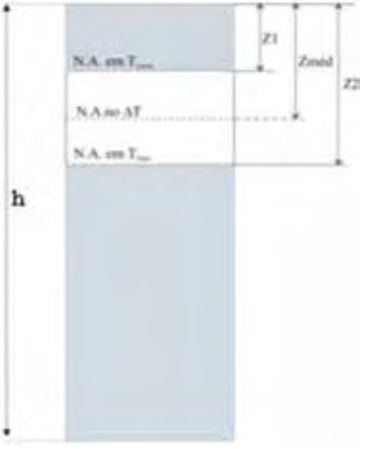


Figura 9. Determinação da área de infiltração no poço (LEÃO CARVALHO, 2008).

A taxa de infiltração *I* é calculada por meio da relação do volume infiltrado pela área de infiltração da estrutura, em relação ao tempo acumulado:

$$I = \frac{V}{A \times \Delta h} \quad (5)$$

em que: *V*= volume em m^3; *A*= área de infiltração; Δt= intervalo de tempo para medir a variação do nível d'água na estrutura (minuto ou fração).

De acordo com Borin *et al.* (2008), o ensaio deve ser realizado em escala real do poço (diâmetro e profundidade) e deve-se adotar como taxa de infiltração média de um poço o tempo decorrido para infiltrar o volume correspondente a 50% do volume do poço, desprezados os primeiros e últimos 25% de profundidade.

Vale lembrar que, em qualquer um dos processos utilizados na avaliação da infiltração de um sistema de infiltração, é importante conhecer o volume de água utilizado no teste. Ao mesmo tempo em que o poço é abastecido, há perda de água por infiltração no sistema, de forma que o volume total de água utilizado é superior ao volume do poço. Recomenda-se a utilização de hidrômetro apropriado para avaliação de volume de água consumido.

5.4 Resultados típicos de ensaios de infiltração em poço

A Figura 10 apresenta um exemplo de medições de nível em um poço no qual ocorreram três enchimentos sucessivos em um mesmo dia. Tanto o enchimento quanto o esvaziamento foram registrados por um sensor de nível d'água (linígrafo).

Nesse ensaio, podem-se observar as curvas de enchimento e esvaziamento do poço. No primeiro teste, o processo de esvaziamento geralmente é mais rápido do que no segundo teste, que, por sua vez, é mais rápido do que no terceiro ensaio, conferindo redução na capacidade de infiltração à medida que o perfil do solo torna-se mais encharcado e o gradiente hidráulico, devido à ação da sucção, diminui. Esse processo reproduz a condição de dias consecutivos de chuva da estação chuvosa.

Figura 10. Variação do nível d'água no poço durante o tempo de enchimento e esvaziamento do poço nos testes 1, 2 e 3. Data da realização dos testes: 24 ago. 2011.

As leituras de campo alimentam uma planilha Excel que calcula o perfil de infiltração do poço. A Figura 11 apresenta um resultado típico obtido no campo experimental II. A taxa de infiltração é representada em função da profundidade, permitindo uma avaliação do perfil como um todo. Foi adotado para o cálculo do perfil de infiltração do solo o método da ABGE (1996). Nesse ensaio, a taxa de infiltração média foi calculada considerando-se que a infiltração ocorre nas paredes laterais e no fundo do poço, apresentando valor médio de $1{,}0 \times 10^{-5}$ m^3/m^2s, equivalente a I= 36 mm/h para o poço de grande diâmetro.

Outra prática possível é a realização de testes de infiltração utilizando furos a trado. Essa alternativa é de fácil execução e baixo custo quando comparada com a execução de ensaios em poços em escala real. Esse tipo de ensaio é recomendado quando a área estudada é extensa e/ou heterogênea, exigindo medições em vários pontos. Na Figura 11, a taxa de infiltração média para o poço de pequeno diâmetro é de $2{,}5 \times 10^{-5}$ m^3/m^2s, equivalente a I= 90 mm/h.

Conclui-se que nesse caso, o ensaio de poço de pequeno diâmetro, poço a trado, superestimou a taxa de infiltração do poço de grande diâmetro.

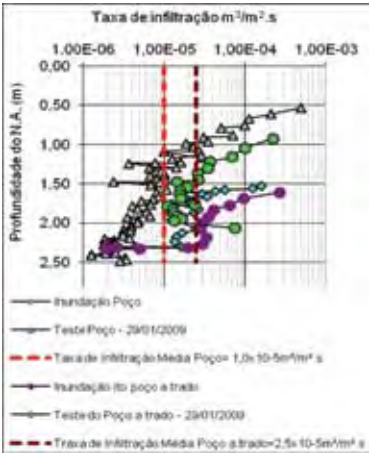


Figura 11. Taxa de infiltração do perfil de solo para o poço a trado (poço pequeno) e poço de grande diâmetro (LEÃO CARVALHO *et al.*(2011).

5.4.1 Ensaio de infiltrômetro de anéis concêntricos

O ensaio de infiltrômetro de anéis concêntricos tem sido constantemente utilizado na área agrícola e no manejo do solo. A superfície irregular de um solo pode apresentar depressões, macroporosidade provocada pelas raízes das plantas e pelo movimento do ar, vapor d'água e água no solo. A Figura 12 mostra o desenho manuscrito de Horton (1933), analisando o movimento do ar e da água no solo, relacionado com as características da superfície do solo e a presença de canais ou pedotubos (macroporos).

Figura 12. Comportamento da água e ar em presença de um macroporo (manuscrito de HORTON, 1933 *apud* BEVEN, 2004).

O ensaio de infiltração por infiltrômetro de anéis concêntricos é bastante utilizado na avaliação da infiltrabilidade para a determinação da parcela de infiltração do balanço hídrico de um local e de bacias de infiltração. Ele pode ainda ser utilizado na determinação da taxa de infiltração na base de poços e trincheiras e em camadas de apoio de colchões e pavimentos drenantes.

Os principais fatores que modificam a capacidade de infiltração da superfície do solo são:

a) a cobertura do solo, que poderá favorecer a infiltração da água no solo;

b) alguns tipos de vegetação que possuem um sistema radicular, que melhor favorece a absorção da água através das raízes ao produzirem macroporos;
c) o manejo dos solos, que tende a melhorar a capacidade de infiltração do solo. No entanto, se esse manejo for inadequado ou se a camada de cobertura vegetal for retirada sem que se faça a sua reposição quase que imediata, a capacidade de infiltração pode piorar. Por um lado, a superfície exposta do solo fica sujeita ao fenômeno do encrustamento, resultante do impacto de gotas de chuva ou ressecamento, dificultando a infiltração; por outro, alguns insumos e defensivos agrícolas podem reagir com o solo, defloculando-o e facilitando o processo de encrustamento.

Em estruturas ou sistemas de controle das águas pluviais na fonte, tais como poços, valas, colchões ou trincheiras, pode-se determinar a condutividade hidráulica do solo saturado utilizando infiltrômetros de anéis concêntricos cravados na superfície do terreno. O ensaio consiste em cravar dois tubos rígidos com dimensões mais usuais de 30,0 cm de diâmetro, anel interno e de 60,0 cm, anel externo, ambos com altura de 30,0 cm. Para o ensaio, os anéis são cravados concentricamente pelo menos 10,0 cm no solo. A carga hidráulica é então mantida constante por meio do abastecimento de água nos anéis. O teste deve ser feito para diferentes cargas hidráulicas. As leituras são feitas de acordo com a redução da carga hidráulica em relação ao tempo. Dependendo do tipo de solo, a frequência de leitura pode variar de 30s a 5min.

Durante o ensaio, a água é adicionada nos dois compartimentos dos anéis. A função do anel externo é evitar a dispersão da água a partir do anel interno e garantir a verticalidade do movimento da água no solo. Para tanto, o anel externo deve ter o mesmo nível d'água do interno.

A taxa de infiltração é considerada constante quando a vazão de alimentação do cilindro central se mantiver sem se alterar durante um período de tempo considerável, até que não haja rebaixamento do nível d'água no anel interno. O volume médio infiltrado nos últimos minutos é utilizado para calcular a condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica é calculada de acordo com as formulações tradicionais da Lei de Darcy.

Barraud (2009) considera imperativo fazer medições em vários pontos da área, mesmo para pequenos espaços, visto que a variabilidade espacial é geralmente grande, além das incertezas com que se mede a condutividade hidráulica.

Segundo Barraud (2009), a literatura refere-se aos limites inferiores de viabilidade de aplicação do método na avaliação da condutividade saturada, não devendo ser inferior a 10^{-6} m/s.

A Figura 13 mostra o conjunto de anéis e o esquema de medição em campo da taxa de infiltração superficial de um solo.

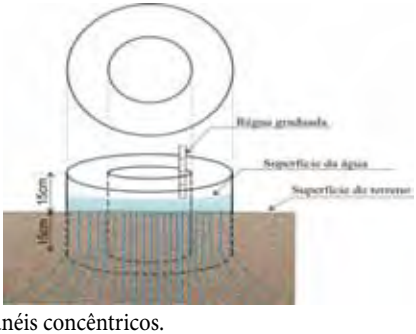


Figura 13. Infiltrômetro de anéis concêntricos.

5.4.2 Condutividade hidráulica e permeabilidade

Em um solo saturado que perde água até transformar-se em um solo não saturado e vai continuamente diminuindo seu grau de saturação, o ar vai progressivamente substituindo a água dos poros. Na avaliação desse fenômeno, dois parâmetros são importantes: a condutividade hidráulica, que determina a capacidade de transmitir água, e a curva característica de retenção de água do solo, que determina a sua capacidade de armazenar e reter água. A capacidade de armazenar corresponde a um aspecto mais físico, o da porosidade e sua distribuição; já a capacidade de reter ou interagir com a água está ligado à energia potencial do mineral. Essa energia potencial acaba atuando como energia diferencial no processo de infiltração, somando-se o seu efeito à carga hidráulica imposta pela energia gravitacional atuante na coluna d'água.

A Figura 14 apresenta a curva de infiltração da superfície de um ensaio de campo utilizando o processo do infiltrômetro de anéis concêntricos.

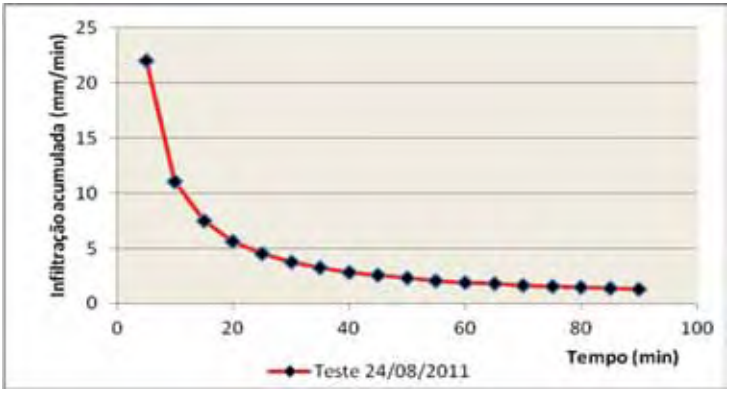


Figura 14. Resultado de um ensaio de Infiltração.

6 Dimensionamento de estruturas de infiltração

O dimensionamento de estruturas de infiltração deve partir do princípio de que o solo poderá permitir a infiltração total ou parcial de certo volume de água proveniente de chuva determinado por testes *in situ*. Acima desse volume, ocorrerá o escoamento superficial e, no caso dos centros urbanos, o lançamento do excedente deverá ser feito na rede pública de drenagem de águas pluviais. Para o dimensionamento de um sistema de infiltração utilizando poços, é necessário conhecer o volume de água capaz de infiltrar no solo de acordo com sua a taxa de infiltração, que poderá ser obtida, dentre outros, por meio de um ou mais dos métodos citados.

6.1 Cálculo do volume de aporte

O volume de aporte é o volume de água considerado para o dimensionamento da estrutura. O volume de aporte pode ser determinado a partir de dados e critérios que avaliam a

intensidade pluviométrica de uma região. Esses dados e critérios estão disponíveis na literatura, de forma que os profissionais podem analisá-los e compará-los, escolhendo os critérios mais convenientes ao projeto. Cabe destacar que o Decreto Presidencial nº 6.666, de 27 de novembro de 2008 instituiu legalmente a INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais).

Podem-se citar três critérios distintos para o cálculo do volume de aporte:

a) Critério A: NBR 10844/1988, que adota os estudos de Pfafstetter (1957);
b) Critério B: Equação de chuva da localidade – no caso do Estado de Goiás, sul de Tocantins e Alto Garças no Mato Grosso, recomenda-se a equação de Costa e Prado (2003);
c) Critério C: baseado na compensação diária, utilizando dados de estação pluviométrica mais próxima.

Com relação ao Critério A, segundo Baptista e Pinto Coelho (2002), a dimensão dos componentes da instalação de esgotamento pluvial depende basicamente de três fatores: a) intensidade pluviométrica; b) área de contribuição; c) impermeabilidade do local. A esses critérios deve-se, porém, adicionar a determinação do volume de água a ser utilizado para consumos diversos.

Intensidade pluviométrica é a razão entre a altura pluviométrica precipitada e o intervalo de tempo em que ocorreu essa precipitação. A determinação desse parâmetro depende de análises estatísticas das precipitações mais intensas registradas numa região ao longo dos anos, visando estabelecer relações que determinam o período de retorno de um dado evento e, assim, estabelecer a segurança, os riscos ou a possibilidade de falhas do sistema instalado.

A norma brasileira NBR 10844/89 de instalações de águas pluviais estabelece os seguintes valores para tempo de retorno, a serem adotados considerando uma precipitação de 10 minutos:

a) áreas pavimentadas – 1 ano;
b) coberturas ou terraços – 5 anos;
c) áreas onde não é permitido empoçamento ou extravasamento – 25 anos.

As intensidades pluviométricas recomendadas são as sugeridas no trabalho de Pfafstetter (1957) citado por Baptista e Pinto Coelho (2002). Tem-se, como exemplo, na Tabela 2, a intensidade pluviométrica obtida para a cidade de Goiânia, analisando diversos tempos de retorno.

Tabela 2. Intensidade pluviométrica (mm/h) em Goiânia, Go para duração de 5 minutos (PFAFSTETTER, 1957) citado por Baptista e Pinto Coelho (2002).

Período de retorno (anos)	1	5	25
Intensidade pluviométrica (mm/h)	120	178	192

Para outras localidades, recomenda-se consultar a tabela da NBR 10844/88 sobre chuvas intensas no Brasil.

Baseado nesse critério, o cálculo do volume de aporte é função da intensidade pluviométrica (I) de projeto. O índice mais utilizado para dimensionamento dos projetos de águas pluviais de áreas urbanizadas é o índice com período de observação de 5,0 min e tempo de retorno de 5 anos.

Sob essas condições o volume de aporte (V_{aporte}) é calculado de acordo com a Equação 6:

$$V_{aporte} = I \times Área \times Tempo \quad (6)$$

Com relação ao Critério B, Cecílio *et al.*(2003) referem-se, em seu trabalho, que o Brasil dispõe de um número considerável de equações de chuvas intensas determinadas para diversas localidades dos Estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo. Segundo Cecílio *et al.*(2003) essas equações foram obtidas, respectivamente, em estudos realizados por Fendrich e Freitas (1992), Pinto *et al.*(1996), Silva *et al.* (1999a, 1999b, 2002), Freitas *et al.* (2001) e Cecílio *et al.*(2003). Para os Estados de Goiás, sul do Tocantins e Alto Garças no Mato Grosso, utiliza-se a equação apresentada por Costa e Prado (2003)

As equações de chuvas intensas são necessárias para o cálculo da vazão de dimensionamento de drenos, vertedores de barragens e obras de proteção contra cheias e erosão hídrica. Uma dificuldade frequentemente enfrentada pelos técnicos é a inexistência dessa equação para a localidade onde vai ser realizado o projeto. Nesse caso, o problema pode ser contornado utilizando-se a equação determinada para o pluviógrafo mais próximo, quando situado em região climática similar, ou interpolando resultados obtidos nas proximidades do local de interesse. Costa e Prado (2003) propuseram as seguintes equações gerais:

$$I_{mm/min} = \frac{B1 \times \left(T^{\alpha + \frac{\beta}{T^{\gamma}}}\right)^{\delta}}{(t+c)^{b}} \quad \text{Equação válida para:1 ano} \leq T \leq \text{8 anos} \quad (7)$$

$$I_{mm/min} = \frac{B2 \times T^{\alpha}}{(t+c)^{b}} \quad \text{Equação válida para:8 anos} < T \leq \text{100 anos} \quad (8)$$

Nessas equações, **T** é o período de retorno; **t** é o tempo de duração das chuvas; **B1**, **B2**, **α**, **β**, **δ**, **γ**, **b** e **c** são constantes cujos valores são tabelados de acordo com os parâmetros locais de 126 estações localizadas em municípios dos estados estudados.

Para Goiânia, GO, foram obtidos os parâmetros a seguir, considerando-se chuva com 5 minutos de duração e as coordenadas geográficas latitude – 16º 40' e longitude – 49º 16':

a) Parâmetros locais: b = 0,974711; B1 = 56,7928; c = 24,8; B2 = 64,3044;
b) Parâmetros **α**, **β**, **γ**, e **δ** são parâmetros regionais constantes aplicados a toda a região e dependem do período de retorno: **α** = 0,14710; **β** = 0,22; **γ** = 0,09; **δ** = 0,62740.

Costa e Prado (2003) recomendam que, para redes de drenagem urbana, o período de retorno pode variar de T= 2 anos para bairros com baixa densidade populacional a T = 15 a 20 anos para regiões centrais das cidades.

Quanto ao Critério C, Leão Carvalho (2008) apresentou um método que não propõe infiltrar todo o volume de aporte sobre uma superfície, mas, sim, fazer uma compensação diária levando-se em conta os dias de maior intensidade pluviométrica e os dias secos da estação. Procura-se, nesse método, evitar o dimensionamento de elementos de infiltração que trabalhem com sua capacidade máxima em poucos dias do ano e fique ocioso nos demais. No método em questão, é avaliado o volume de água que entra em uma estrutura de infiltração, determinando a porcentagem que foi infiltrada, a porcentagem que ficou armazenada no sistema e a parcela que seria lançada na rede pública de drenagem. É avaliado o volume diário que entra com base nos registros pluviométricos. Posteriormente, calcula-se o volume que

infiltrará nas próximas 24h e, assim, calcula-se a oscilação diária do nível d'água dentro do poço e verifica-se a possibilidade de transbordamento naquela data.

Adotando o Critério C, o projetista pode usar um percentual de eficiência do poço ao longo dos anos, para então encontrar as dimensões ideais para o poço. Em seu estudo, Leão Carvalho (2008) utilizou a intensidade pluviométrica determinada diariamente na cidade de Goiânia, num período de observação de 25 anos compreendido entre os anos de 1978 a 2002. Foram utilizados dados coletados na Estação Meteorológica da Escola de Agronomia da UFG.

Comparando-se o volume de aporte, obtido por meio de um dos critérios citados, com a capacidade de armazenar e de infiltrar do elemento de infiltração, bem como a demanda para uso, é possível projetar-se um sistema de infiltração ou um conjunto de sistemas para armazenar e infiltrar o volume de água precipitada na área em que se pretende controlar os fluxos de águas pluviais. Considerando-se que a taxa de infiltração em um perfil de solo é um parâmetro muito sensível a qualquer variação da umidade do maciço e do próprio perfil e depende do nível d'água no poço, recomenda-se adotar para os resultados obtidos coeficiente de segurança igual a dois ou três aplicados sobre a taxa de infiltração média encontrada.

7 Exemplo de execução de sistema composto de poços e trincheiras

A sequência de fotografias da Figura 15 mostra os materiais e processos de execução de um projeto de drenagem por infiltração composto por poços e trincheiras.

Para a escavação de poços e trincheiras, foram utilizados equipamentos mecânicos com intervenção humana, onde seu uso era mais difícil, como nos pontos das conexões entre o poço e a trincheira.

Uma tubulação disposta no interior da trincheira interligou os poços de infiltração e fez a adução dos fluxos. Essa tubulação pode ser perfurada com broca de diâmetro 10 mm em 2/3 de seção do tubo com a finalidade de conduzir os fluxos e favorecer a infiltração no percurso do fluxo. Destaca-se que tubos já perfurados destinados a drenagem encontram-se disponíveis no mercado e podem ser utilizados. Para revestimento dos poços de infiltração, podem ser utilizadas manilhas em concreto armado perfuradas, ou alvenaria em tijolos maciços ou furados assentados em crivo, ou ainda pneus usados perfurados e assentados de forma a permitir a saída da água para infiltrar-se no solo. O tipo de revestimento dos poços depende do empreendimento, da disponibilidade de materiais e de especificidades da obra, como a carga sobre o local. Assim, em empreendimento que exige maior rapidez na execução de um grande número de poços, podem-se utilizar manilhas de concreto e pneus usados. Para os casos onde a superfície está sujeita a algum tipo de carregamento, como circulação de veículos ou outros tipos de carregamento, os revestimentos como pneus usados, que são compressíveis, podem ser trabalhados para se tornarem mais rígidos. Em qualquer uma das situações, o poço é revestido com manta de geotêxtil na interface solo-revestimento.

Manilhas em concreto armado pré-moldado e pneus usados perfurados ou outro revestimento são utilizados para dar estabilidade ao perfil de solo nas paredes do poço. Cuidados especiais são adotados no uso de pneus como revestimento, perfurando-os para evitar

acumular água e possibilitar a proliferação de vetores. Para melhorar as condições de fluxo, promove-se o afastamento vertical entre eles por meio da inclusão de pedaços dos próprios pneus.

A seguir, são apresentados os processos utilizados para a escavação dos poços e trincheiras.

Os poços podem ser escavados utilizando uma perfuratriz apropriada para produzir o diâmetro projetado. A escavação das trincheiras pode ser feita utilizando uma retroescavadeira, e o acabamento entre a junção poço trincheira é feita por escavação manual (Figuras 15a, b, c, d).

(a) (b) (c) (d)

Figura 15. a) Perfuratriz; b) vista de um poço escavado; c) escavação de trincheira com o uso da retroescavadeira, d) trincheira e poços escavados (LEÃO CARVALHO *et al.*, 2011).

A Figura 16 mostra o processo de revestimento de poços e trincheiras com manta de geotêxtil (a) e revestimento dos poços com tubos de concreto perfurado (b e c).

(a) (b) (c)

Figura 16. Escavação manual das trincheiras e configuração final dos poços e trincheiras. Processo utilizado para descer as manilhas nos poços e configuração final de um poço revestido (LEÃO CARVALHO *et al.*, 2011).

Nas trincheiras, com a finalidade de se separar a interface solo e o sistema de infiltração, foi utilizado o envelopamento do material granular de preenchimento com a manta geotêxtil (Figura 17b) e o preenchimento com a brita1(Figura 17c).

Nos poços, a manta de geotêxtil foi colocada na interface solo-revestimento e no fundo dos poços. Nesse caso, é colocada sobre ela uma camada de 20 cm de brita.

Sistema de revestimento dos poços com a manta geotêxtil é um processo simples que utiliza grampos para fixar o tecido nas paredes dos poços ou trincheiras antes da colocação do revestimento, como os anéis de concreto pré-moldado ou pneus usados (Figura 17a, b, c).

(a) (b) (c)

Figura 17. Colocação da manta geotêxtil no revestimento do poço e enchimento das trincheiras. Configuração final da manta nas trincheiras e camada de brita 1 no fundo da trincheira a), b) e c) (LEÃO CARVALHO *et al.* 2011).

A Figura 18 mostra o detalhe entre poço e trincheira, sempre com precaução em relação à separação por meio de geotêxtil do sistema de infiltração do solo.

(a) (b)

Figura 18. Ligação poço trincheira e detalhe das tubulações com os poços (LEÃO CARVALHO *et al.*, 2011).

As Figuras 19a e 19b apresentam detalhes do conjunto poço-trincheira e tubulação de adução que percorre o interior da trincheira. As figuras mostram o processo contínuo de execução do sistema e, no primeiro plano, apresentam o trecho onde o sistema brita e tubulação foi fechado, encerrando o sistema de envelopamento.

Figura 19. Colocação de tubulação ao longo das trincheiras. Vista geral com os tipos de conexão das tubulações secundárias com as unidades habitacionais (LEÃO CARVALHO, *et al,* 2011).

A Figura 20 mostra, à esquerda, uma linha de poços acabados, e à direita os poços já com as tampas. A Figura 20 apresenta a configuração final do sistema, incluindo a conexão das tubulações secundárias de coleta de água de uma unidade habitacional.

Figura 20. Vista geral dos poços escavados e revestidos à esquerda e poços já com as tampas à direita (LEÃO CARVALHO *et al*., 2011).

8 Considerações finais

Este capítulo mostrou que o dimensionamento e a implantação de poços e trincheiras é relativamente simples, mas requer estudos de engenharia voltados para a definição de sistemas eficientes e para avaliação dos riscos oriundos da infiltração concentrada das águas pluviais.

A implantação desses sistemas por unidade individual ou coletiva em casos como os dos condomínios ajuda a tornar a gestão ambiental compartilhada e contribui para a redução dos gastos públicos com sistemas de drenagem de águas pluviais convencionais. Como fruto da implantação desses sistemas, é possível ainda prever a redução da incidência de alagamentos, inundações e erosões terrestres e fluviais. Cabe, no entanto, destacar-se que tanto as inundações como as erosões fluviais devem-se, muitas vezes, ou ao menos parcialmente, à ampliação do fluxo superficial em áreas agrícolas e urbanas submetidas a manejos inadequados. Por vezes, por não ter um reflexo direto e imediato, a nocividade dessas práticas é de difícil associação com os processos de inundação. Entretanto, mesmo indiretamente, ao atuarem ao longo dos anos, assoreando cursos d'água e reservatórios, esses manejos inadequados reduzem a capacidade de armazenamento dos reservatórios e a seção das calhas de drenagem, dando significativa contribuição para a ocorrência desses fenômenos, considerados erroneamente como simplesmente naturais. A origem é muitas vezes antrópica.

Portanto, os poços de infiltração isolados ou compondo sistemas interligados por trincheiras podem ajudar a mitigar problemas como os de erosão, alagamento e inundação, devendo para cada caso serem analisados riscos como os de colapso estrutural do solo, erosão interna e perda de capacidade de suporte do maciço com reflexos em obras de engenharia como estruturas de pavimento e edificações.

Agradecimentos

Agradecemos a CAPES, CNPq e FINATEC o financiamento da pesquisa; a UFG, UnB e Furnas, instituições que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa orientando e

disponibilizando seus laboratórios, e à Tripoli Construtora, que cedeu a área para pesquisa e aceitou o uso de novas tecnologias, resultado da pesquisa.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE), (1996). Ensaio de permeabilidade em solos. Orientação para sua Execução no Campo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Boletim IV, 3ª Edição Revisada, São Paulo, SP, 31p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 6508: Solo, grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 7p.

_____. (1984). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

_____.(1986). NBR 6457: Solo – Determinação do teor de umidade de solos. Rio de Janeiro, 3 p.

_____. (1993). NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, RJ, 15p.

_____. (1997). NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, RJ, 60p.

_____. (1986). NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, RJ,9p.

_____. (1989) NBR 10844: Água – Instalações prediais de águas pluviais, procedimento. Rio de Janeiro, 13 p.

_____. (2001). NBR – 6484ABNT: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 12p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D5093 – 02 (2008). Standard test method for field measurement of infiltration rate Using Double-Ring Infiltrometer with Sealed-Inner Ring. 7 p.

BATISTA, M. B.; PINTO COELHO, M. M. L. (2002). Fundamentos de engenharia hidráulica. 1. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 440 p.

BEVEN, K. (2004). Robert E. Horton´s perceptual model of infiltration processes. Environmental Science, Lancaster University, Lancaster, UK. Hydrol. Process. n.18, p. 3447-3460. 24 p.Published online in Wiley Inter Science. Disponível em: . Acesso em: 28 jan. 2007.

BETTES, R. (1996). Infiltration drenage – Manual of good practice. Construction Industry Research And Information Association. Report 156, © CIRIA. ISBN 0 86017 457 3. ISSN 0305. 408X. SW1P 3AU CIRIA, 6 Storey's Gate, Westminster, London SW1P 3AU. 128 p.

BORGES, C. R. (2010). Comportamento hidráulico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia-GO. Goiânia: UFG. 2 v., 257 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D. D. (2004). Infiltração da água no solo. 2ª ed. Viçosa, MG. Editora UFV, 120 p.

BULUT, R.; LEONG, E. C. (2007). Indirect measurement of suction. Geotechnical Geological Engineering. 20p.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. (2003). Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, Campina Grande, PB, v.7, n.3, p.501-504, DEAg/UFCG. Disponível em: 11 agos. 2011 http://www.agriambi.com.br.

CEDERGREN, H. R (1977). Seepage, draninage, & flow nets 2nd ed. New York, London, Sidney, Toronto: Wiley-Interscience Publication, Jonh Wiley & /sons. 534p.

COSTA, A R.; P., L. A. (2003). Especialização de chuvas intensas para o estado de Goiás e o sul de Tocantins. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP, v. 23, n. 2, p. 268-276.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J.A. (1979). Groundwater. New Jersey, USA: Prentice Hall, Inc. 604 p.

LEÃO CARVALHO, E. T. (2008). Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na Zona Norte da Cidade de Goiânia. Goiânia: UFG, 229 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

LEÃO CARVALHO, E. T. *et. al.* (2011). Estudo de caso: poços e trincheiras de infiltração para controle de enchentes e prevenção de erosão no Córrego Cascavel. *In*: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 5, Brasília, DF Editora Ipanema Ltda., v. 1. p. 219-230.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIAS. Boletins meteorológicos – Planilhas mensais 1978-2002 e 2005. Setor de engenharia Rural – Escola de Agronomia. Disponível em: http://www.meteorgo.hpg.ig.com.br/. Acesso em: 18 abr. 2005.

OLIVEIRA, A. M. dos S. (1996). Ensaio de permeabilidade em solos – Orientação para sua Execução no Campo. Boletim IV da ABGE, 3. ed., São Paulo, SP. 31 p.

PFAFSTETTER, O. (1957). Chuvas intensas no Brasil. 2. ed., Rio de Janeiro: DNOS. 426 p.

SCHUELER, T. R. (1987). Controlling urban Runoff: a practical manual for planning and designing urban best management practices. Washington D.C.: Metropolitan Washington Council of Governments. 275p.

SOURTHEAST MICHIGAN COUNCIL OF GOVERNMENTS – SEMCOG (2008). Low Impact Development Manual for Michigan: A Design Guide for Implementors and Reviewers. 512 p. Disponível em: www.semcog.org. Acesso em: 17 mar. 2010. infocenter@semcog.org.

TUCCI, C. E. M. (2005). Gestão das inundações urbanas. Global Water Partnership South América.1. ed. Porto Alegre RS. 196 p.

Capítulo 20

Sensibilidade do desempenho de poços de infiltração às propriedades do solo não saturado

Alexandre Garcês de Araújo
Eufrosina Terezinha Leão Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Maurício Martines Sales

1 Introdução

Com o acelerado e desordenado adensamento populacional, problemas de drenagem são frequentes em grandes cidades. O alto índice de impermeabilização das superfícies, o aumento do escoamento superficial e as grandes inundações são exemplos de problemas que vêm se repetindo frequentemente nos grandes centros. Medidas alternativas já vêm sendo adotadas por algumas cidades em conjunto com os tradicionais sistemas de drenagem. Dentre essas medidas alternativas, a utilização de estruturas de infiltração vem ganhando espaço.

As estruturas de infiltração minimizam o impacto causado pelos tradicionais sistemas de drenagem, que acumulam a contribuição de grandes bacias em córregos e vertentes. Com a utilização de sistemas de infiltração, parte da precipitação é drenada no próprio local. Com isso, a quantidade de água do subsolo, reduzida drasticamente com as impermeabilizações, é melhorada. O baixo custo dessas estruturas é outro atrativo para sua utilização.

Os poços de infiltração, estruturas que já vêm sendo utilizadas em Goiânia, por exemplo, são sistemas pontuais capazes, inicialmente, de reservar certo volume nos momentos de pico e, em seguida, infiltrar no solo a água acumulada. Além disso, atuam na recarga do lençol freático.

Apesar de possuir concepção adequada para numerosas situações, o dimensionamento dessas estruturas deve sempre seguir um controle técnico, sendo necessários parâmetros de avaliação do desempenho dos sistemas. Propriedades importantes do solo não saturado e a situação do solo onde são implantadas as estruturas, como a curva característica e a compressibilidade do solo, não vêm sendo observadas no dimensionamento. Os diferentes tipos de solos podem promover comportamento diferenciado das estruturas, podendo até inviabilizar sua utilização como estrutura de infiltração. Assim, tornam-se indispensáveis a caracterização e o conhecimento das principais propriedades hidromecânicas do solo no dimensionamento de tais estruturas.

Este capítulo apresenta uma série de análises de sensibilidade que foram desenvolvidas para entender o processo de infiltração de água no solo, bem como avaliara relação entre os parâmetros do solo, a geometria do poço de infiltração, as condições de contorno, as condições iniciais e o desempenho do poço. Foram utilizadas como referência as condições típicas para alguns solos de Goiânia, GO, onde foram implantados campos experimentais para avaliação de estruturas de infiltração.

2 Abordagem formal para a análise de sensibilidade

As análises de sensibilidade podem indicar quais propriedades do solo têm influência significativa no desempenho da infiltração dos poços. O conhecimento do grau de importância das propriedades do solo oferece elementos para a decisão sobre quais propriedades e parâmetros devem ser objetos de estudos mais cuidadosos e quais podem ser considerados de menor importância no processo. Valores com menor impactos podem, em certos casos, ser estimados. Dentre as várias formas de análise de sensibilidade, foi selecionada para este estudo a análise de sensibilidade por meio de diagrama tornado, muito difundida na ciência de Análise de Decisão (CLEMEN, 1996).

O principal objetivo da análise de sensibilidade é ajudar na decisão e determinar quais variáveis de entrada têm influência significativa na decisão (CLEMEN, 1996). No contexto dos problemas que envolvem estruturas de infiltração, o objetivo é definir como as propriedades do solo interferirão no desempenho dos poços. O diagrama tornado (Figura 1) foi selecionado para ser usado na análise do desempenho da infiltração. Esse tipo de diagrama mostra e compara como a variabilidade de cada propriedade do solo é transformada em variabilidade no desempenho da estrutura.

O tempo de infiltração foi selecionado como parâmetro de desempenho. Dois tipos de diagrama tornado podem ser usados para o mesmo propósito, chamados de diagrama tornado "caso base" e diagrama tornado de "evento". O diagrama tornado caso base é uma maneira simples de estudo de sensibilidade das variáveis de entrada, uma vez que não se baseia em regras estritas de construção. Esse tipo de diagrama é indicado quando não há disponibilidade detalhada de estudos estatísticos da variabilidade dos parâmetros.

Os diagramas tornados de eventos são divididos em: a) determinístico e b) probabilístico. São baseados em rigorosas regras de construção e em informações estatísticas detalhadas sobre as variáveis de entrada. No diagrama tornado evento determinístico, uma fonte de incerteza no modelo é inserida de cada vez, e o modelo é analisado com o restante das fontes de incerteza assumidas como sendo perfeitamente determinadas. Correlações entre os parâmetros de entrada não são consideradas em diagramas do tipo determinístico. No diagrama tornado evento probabilístico, uma fonte de incerteza do modelo é removida de cada vez, e todas as informações probabilísticas remanescentes são guardadas, incluindo qualquer correlação existente.

O procedimento para construção do diagrama tornado probabilístico adotado neste trabalho é baseado no cálculo da média e desvio padrão do tempo necessário para a infiltração da água no poço. Para o cálculo do diagrama tornado de evento probabilístico, foi utilizado o método híbrido das estimativas pontuais desenvolvido por Gitirana Jr. (2005). O método é baseado nas seguintes equações:

$$E[T(X)]_k = T(E[X]) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} \left[p_i^+ T(x_i^+) + p_i^- T(x_i^-) - T(E[X]) \right] \tag{1}$$

$$Var\,[T(X)]_k = \left\{ T(E[X]) - E[T(X)]_k \right\}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} \left[\begin{array}{l} p_i^+ \left\{ T(x_i^+) - E[T(X)]_k \right\}^2 \\ + p_i^- \left\{ T(x_i^-) - E[T(X)]_k \right\}^2 \\ - \left\{ T(E[X]) - E[T(X)]_k \right\}^2 \end{array} \right] \tag{2}$$

em que:

$E\,[T\,(X)]_K$ = primeiro momento estatístico do tempo de infiltração, calculado quando a variabilidade (incerteza) da variável *k* é removida;

$Var\,[T\,(X)]_K$ = segundo momento estatístico do tempo de infiltração, calculado quando a variabilidade da variável *k* é removida;

T = temponecessário para a infiltração da água no poço;

k = variável de interesse;

$T\,[E\,(X)] = T\,(E[x_1], E[x_2],..., E[x_n])$;

$T\,[x_i^{\pm}], = T\,(E[x_1], E[x_2], ...E[x_{i-1}], x_i^{\pm}, E[x_{i+1}], ..., E[x_n]$;

$x_i^{\pm} = E[x_i] + \xi^{\pm}\,[x_i]\;\sigma\,[x_i]$;

X = conjunto de variáveis de entrada;

$$p_i = \frac{1}{2}\left[1 \mp \sqrt{1 - \frac{1}{1 + [\gamma_1[x_i]/2]^2}}\right];$$

$\gamma_1[x_i] = \mu_3[x_i]/\{\sigma[x_i]\}^3$;

$\mu_3[x_i]$ = terceiro momento estatístico da variável x_i;

$$\xi^{\pm}\,[x_i] = \gamma_1[x_i]/2 \pm \sqrt{1 + (\gamma_1[x_i]/2)^2};$$

$\rho[x_i, x_j]$ = correlação entre as variáveis x_i e x_j;

$$\rho[x_i, x_j] = \frac{Cov[x_i, x_j]}{\sigma[x_i]\sigma[x_j]};$$

$\sigma[x_i]$ = Desvio padrão.

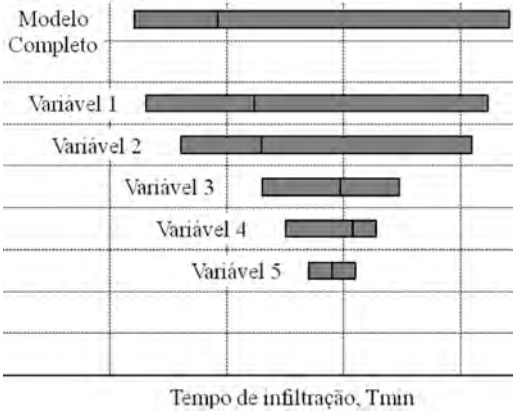


Figura 1. Exemplo de diagrama tornado evento probabilístico.

Essas equações são uma versão mais simples do modelo original, pois foram removidos os termos que consideram a correlação entre os parâmetros de entrada. O procedimento de construção de diagramas tornados do tipo probabilístico segue estes passos:

a) a variabilidade (ou incerteza) de uma variável de entrada é removida, e a média e variância do tempo de infiltração são calculadas utilizando as Equações 1 e 2;
b) o primeiro e o segundo momento estatístico, obtidos para o tempo de infiltração, são usados para calcular o 10° a 50° e 90° percentil da distribuição de frequência – é assumida uma distribuição lognormal para o tempo de infiltração, para calcular os percentuais;
c) os passos *a* e *b* são repetidos para todas as variáveis de entrada;
d) uma barra é criada no diagrama tornado para cada variável calculada utilizando as etapas de (*a*) até (*c*);
e) cada barra corresponde à variável de entrada cuja variabilidade (incerteza) foi removida do modelo – o início e o final da barra correspondem ao valor da 10° e 90° percentil do tempo de infiltração, e a linha próxima à metade da barra corresponde a 50° percentil;
f) os procedimentos de (*a*) até (*d*) são repetidos para o "modelo completo" (i.e., sem remover qualquer incerteza das variáveis de entrada) e a barra do "modelo completo" é criada;
g) finalmente, as barras são ordenadas de acordo com o tamanho, da maior para menor, dando ao diagrama a aparência de um tornado (a menor barra indica a variável de maior impacto).

O tamanho de cada barra mostrada na Figura 1 é diretamente proporcional a cada interferência na análise do problema. A primeira barra é a do modelo completo. A redução no tamanho das demais barras é proporcional à redução na incerteza do tempo de infiltração, quando a incerteza associada com a variável de entrada em questão for removida.

A barra com o tamanho mais próximo da barra modelo completo é a variável de entrada cuja incerteza causa menor impacto ao problema. Por exemplo, a Figura 1 mostra que as variáveis 3, 4 e 5 têm impactos consideravelmente maiores que as variáveis 1 e 2 .

3 Materiais e métodos

Extensas análises de sensibilidade do desempenho das estruturas de infiltração às propriedades de diferentes solos de Goiânia foram realizadas por Garcês (2010). São apresentados aqui os resultados dos estudos envolvendo os solos residuais de micaxisto que ocorrem na região centro-sul e uma breve comparação com solos residuais de granulito que ocorrem na região noroeste de Goiânia.

Garcês (2010), para avaliar o processo de infiltração de água em poços, utilizou resultados de ensaios de campo obtidos de poços instalados e monitorados. Dois tipos de poço com diâmetro de 120 cm foram avaliados: um poço chamado de poço grande, com profundidade de 3,50m, e outro poço chamado de poço pequeno, com profundidade de 2,50 m. Os parâmetros do perfil de solo foram obtidos por meio de ensaios de laboratório de amostras deformadas e indeformadas colhidas do local. Dentre os parâmetros obtidos em ensaios de

laboratório, foram de interesse desse estudo a permeabilidade saturada, a curva característica e a porosidade.

A Figura 2 resume os casos aqui apresentados. O desempenho dos poços foi avaliado em ensaios de campo, nos quais os dois poços foram abastecidos por várias vezes e a variação do nível da água foi medida em função do tempo de infiltração decorrido. O desempenho dos dois sistemas de infiltração, poço grande e poço pequeno, foi analisado considerando suas geometrias diferentes e duas diferentes condições iniciais de distribuição hidrostática de poro pressão, chamadas de NA Raso e NA Profundo. Os modelos foram adotados por representar diferentes possibilidades de implantação de poços de infiltração com diferentes condições iniciais de distribuição sucção, indicando a sensibilidade do desempenho aos parâmetros de cada uma dessas configurações.

Todas as análises de infiltração foram realizadas utilizando o programa FlexPDE v6 (PDE SOLUTIONS, 2009). O programa FlexPDE permite a solução de equações diferenciais parciais, tal qual a de fluxo não saturado, utilizando o método dos elementos finitos para a discretização espacial e o método das diferenças finitas para a discretização temporal do problema. A utilização do programa FlexPDE em análises geotécnicas se encontra extensamente documentada na literatura, como, por exemplo, em Gitirana Jr. (2005).

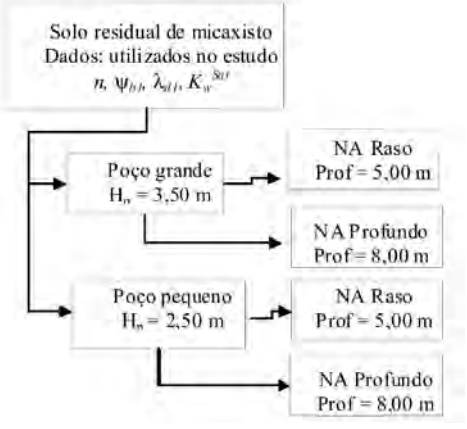


Figura 2. Configuração da análise de infiltração.

3.1 Geometria, condições iniciais e de contorno

A Tabela 1 e a Figura 3 apresentam o resumo das geometrias, condições iniciais e condições de fronteira adotadas. Foram adotadas duas diferentes geometrias para as análises de sensibilidade. A geometria dos poços é composta por duas dimensões: raio e altura. A principal motivação para se considerarem duas geometrias distintas é a verificação da influência da carga hidráulica no desempenho dos poços. Assim, somente a profundidade do poço é alterada. Graças às características da geometria do problema, foi possível utilizar coordenadas cilíndricas e uma representação axi-simétrica do problema tridimensional.

O nível do lençol freático tem importante variação sazonal, influenciando a condição inicial de distribuição de poropressões de água. Durante o ano pode haver variações supe-

riores a 3 m de profundidade. Em situações com distribuição hidrostática de poropressões, essa variação equivale a 30 kPa de variação da distribuição. A condição inicial influencia a capacidade de armazenamento de água do solo em torno do poço.

A análise envolvendo duas diferentes profundidades permitiu avaliar a sensibilidade do desempenho dos poços de infiltração, perante a variação do nível do lençol freático. As profundidades adotadas permitem avaliar casos em que as estruturas podem estar mais próximas ou mais distantes do lençol freático, nos casos do nível do lençol freático estar a 5,0 e 8,0 metros de profundidade adotados.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de geometria e condição inicial.

Variáveis	Condição
Altura do domínio, *Hd*	9 m, igual para todos os casos
Raio do domínio, *Rd*	2,50 m, igual para todos os casos
Altura (profundidade) do poço, *Hp*	2,5 m, 3,5m
Raio do poço, *Rp*	0,60 m, igual para todos os casos
Tempo de enchimento do poço	15 min., igual para todos os casos
Distribuição inicial de poropressão	Hidrostática
Profundidade do lençol freático	5,0 m ou 8,0m

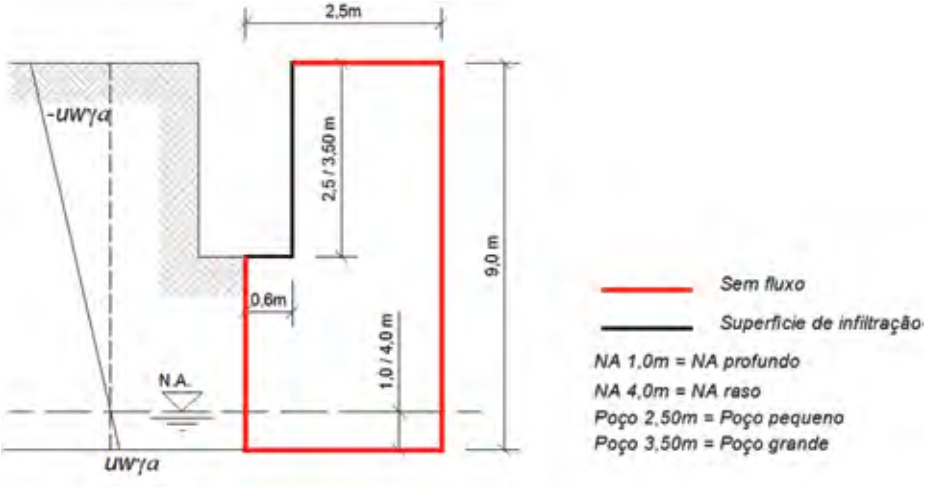


Figura 3. Geometria e condições iniciais e de contorno.

3.2 Parâmetro de desempenho dos poços

O desempenho dos poços de infiltração foi avaliado quanto ao tempo gasto para infiltração. A carga hidráulica é fator importante para definir o tempo. Assim sendo, a taxa de infiltração sofre significante redução conforme ocorre redução do nível d'água no poço. Em alguns solos, essa redução é mais afetada e a taxa de infiltração é satisfatória até 50% do volume de água no interior do poço, reduzindo consideravelmente a partir daí.

Com base nessas considerações, evitou-se adotar o tempo para completa infiltração da água, uma vez que o fim do processo acontece sob baixos gradientes e torna-se lento. Dessa forma, os parâmetros de desempenho adotados foram o tempo gasto para a infiltração de 50%, 70% e 85% do volume de água do poço. Esses parâmetros de desempenho foram considerados nas análises numéricas e na análise de sensibilidade.

3.3 Variabilidade das propriedades do solo

Um dos solos representativos do que ocorre na região da cidade de Goiânia foi escolhido para as análises de sensibilidade aqui apresentadas. Esse solo apresenta, relativamente, alta porosidade e permeabilidade e é altamente intemperizado. A Tabela 2 apresenta as propriedades utilizadas na análise de sensibilidade e os respectivos coeficientes de variação. Os valores médios foram determinados com base em ensaios de laboratório. Foi adotada a equação bimodal da curva característica proposta por Gitirana Jr. e Fredlund (2004).

Os coeficientes de variação foram baseados na incerteza típica dessas propriedades do solo e em valores sugeridos por Gitirana Jr. (2005). Ao contrário do solo saturado, estudos que envolvem variabilidade de parâmetros do solo não saturado são pouco encontrados na literatura. Gitirana Jr. (2005) definiu os coeficientes de variabilidade das propriedades apresentadas na Tabela 2 por meio de uma análise estatística extensa de propriedades típicas de solos não saturados. Os registros foram agrupados de acordo com as características texturais que definiram populações distintas.

A análise de sensibilidade utilizando medidas estatísticas das propriedades do solo permite definir de forma mais rigorosa a sensibilidade do desempenho dos poços às variabilidades dessas propriedades. Análises paramétricas utilizando variabilidade não representativa podem resultar em análises de pouco valor.

Para facilitar a representação estatística de variáveis cuja distribuição se aproxima de lognormal, os valores do coeficiente de variação e das propriedades médias foram apresentados em logaritmo natural. A indicação da normalidade ou lognormalidade dessas propriedades é apresentada por Gitirana Jr. (2005). Para utilização do coeficiente de variação, a propriedade deve ser convertida para logaritmo natural.

O coeficiente de variação e as propriedades médias adotadas para as análises compõem modelos de análise para a variabilidade de cada uma das propriedades envolvidas. São nove variações de combinações de parâmetros do solo para cada configuração geométrica. Existem quatro configurações analisadas, quais sejam: Poço Grande com NA Raso, Poço Grande com NA Profundo, Poço Pequeno com NA Raso e Poço Pequeno com NA Profundo. Cada uma das situações foi analisada, totalizando 36 análises.

3.3.1 Curva característica solo-água

O conjunto de variações adotadas neste estudo se encontra resumido na Tabela 3, em que cada linha corresponde a uma análise de infiltração. Os parâmetros da curva característica adotados para as análises do solo foram aqueles correspondentes ao solo de 3,0 m, tendo

sido escolhidos por se tratar de um solo com perfil uniforme e ainda por ter sido, nessa profundidade, a realização do ensaio de condutividade hidráulica do solo não saturado.

A Figura 4 apresenta a curva característica referente aos valores médios, adotadas para o solo. Na figura estão representadas também as curvas características geradas utilizando o valor médio dos seus parâmetros, acrescidos de um desvio padrão e do valor médio reduzido de um desvio padrão. Foram adotados os coeficientes de variação da Tabela 2 para cálculo dos desvios e consideradas apenas as variabilidades do valor de entrada de ar (ψ_{b1}) e da declividade do primeiro trecho da curva característica (λ_{d1}). A variabilidade dos parâmetros da curva característica resulta na variabilidade das propriedades do solo não saturado, estimadas por meio da curva característica e da declividade da função de condutividade hidráulica.

Tabela2. Propriedades médias, coeficiente de variação e desvio padrão para o solo estudado.

Análise	Propriedade do Solo	Parâmetros relacionados	Valor médio	Coeficiente de variação ou desvio padrão
Solo residual de xisto	$\theta = nS$	n	0,640	CV = 17,10%
		$\ln(\psi_{b1})$,ln(kPa)	0,927 (2,50)	CV = 117,60%
		$\ln(\lambda_{d1})$	0,10 (1,109)	σ_d = 0,625
	k^w	$\ln(k^w_{sat})$, ln(m/s)	-11,21($1{,}3\times10^{-5}$)	CV = 14,90%
Solo residual de granulito	$\theta = nS$	n	0,583	CV = 17,10%
		$\ln(\psi_b)$,ln(kPa)	0,788 (2,20)	CV = 117,60%
		$\ln(\lambda_d)$	-1,262 (0,283)	σ_d = 0,45
	k^w	$\ln(k^w_{sat})$, ln(m/s)	-13,22 ($1{,}82\times10^{-6}$)	CV = 14,90%

Solo residual de xisto = λ_{Res1} =0.049, ψ_{b2} =7500, Sb=0.295, ψ_{res2}=11000, S_{res2}=0.016, a=0.08; solo residual de granulito = ψ_{res} =4306.3, λ_{res} =0.02874, a = 0.06. Os números entre parênteses correspondem ao valor original da propriedade.

Tabela 3. Combinações de parâmetros do solo para cada cenário analisado.

Modelo	n	ψ_{b1}(kPa)	λ_{d1}	K_w^{Sat}(m/s)
E (médias)	0,64	2,50	1,109	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
n (+)	**0,75**	2,50	1,109	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
Ψ_{b1} (+)	0,64	**7,34**	1,109	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
λ_{d1} (+)	0,64	2,50	**2,072**	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
K_w^{Sat} (+)	0,64	2,50	1,109	$\mathbf{7{,}22\text{x}10^{-5}}$
n (-)	**0,53**	2,50	1,109	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
Ψ_{b1} (-)	0,64	**0,85**	1,109	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
λ_{d1} (-)	0,64	2,50	**0,594**	$1{,}36\text{x}10^{-5}$
K_w^{Sat} (-)	0,64	2,50	1,109	$\mathbf{2{,}56\text{x}10^{-6}}$

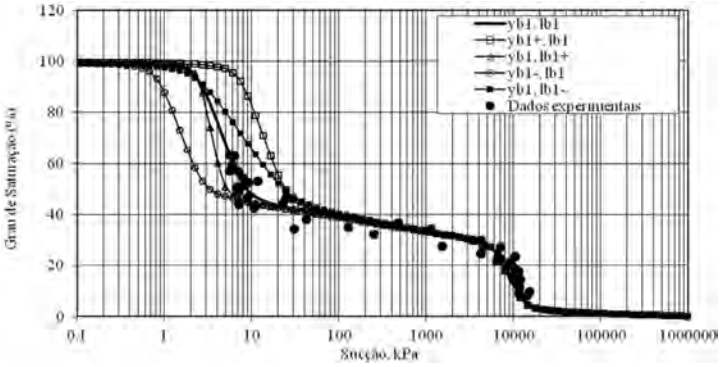


Figura 4. Curva característica do solo e variações adotadas na análise de sensibilidade.

3.3.2 Função de condutividade hidráulica

A função de condutividade hidráulica utilizada foi estimada a partir da curva característica, utilizando-se o modelo de previsão de Brooks e Corey (1964). A variabilidade dos parâmetros da curva característica resulta na variabilidade da função de permeabilidade que é atualizada para cada modelo da curva característica. Além disso, a variabilidade da condutividade hidráulica saturada, k_{sat}^{w}, também causa variabilidade na função de condutividade hidráulica.

A Figura 5 apresenta a função de condutividade hidráulica obtida com o valor médio dos parâmetros da curva característica, variando-se a condutividade hidráulica saturada. Novamente, foi adicionado e subtraído um desvio padrão, para a obtenção das curvas.

4 Validação do modelo numérico

Para validação do modelo numérico, foi feita a comparação dos resultados do *software* FlexPDE e dos resultados medidos no ensaio em campo. Vários autores (GITIRANA Jr. e FREDLUND, 2003a; FEUERHARMEL, 2007; OLIVEIRA, 2003) já utilizaram o programa FlexPDE em soluções numéricas de problemas como estabilidade de taludes, condutividade hidráulica e fluxo transiente de calor e água e obtiveram resultados satisfatórios.

O modelo numérico desenvolvido fornece vários resultados, tais como: variação da coluna de água no poço (chamada aqui de curva de infiltração), distribuição final de poro pressão, distribuição final do grau de saturação, distribuição final da sucção, distribuição final da condutividade hidráulica, taxa de fluxo, entre outros. Os resultados relacionados com distribuição de poropressão e grau de saturação permitem delimitar a área de influência do poço.

Dentre os resultados obtidos na análise numérica, a variação da coluna de água no poço com o tempo (curva de infiltração) foi o resultado utilizado para a comparação do modelo com o ensaio em campo. Essa variável foi escolhida por estar diretamente relacionada com o desempenho do poço, principal elemento de análise deste trabalho, e por ser a variável mais simples de ser obtida em campo.

A Figura 6 mostra a comparação entre o resultado experimental e o resultado do modelo numérico. O resultado experimental da variação da coluna de água no poço foi medida por meio de uma trena e um referencial na parte superior do poço e comparada por um sensor de pressão (GARCÊS, 2010). A curva foi obtida com a plotagem da variação da coluna de água com o tempo. Inicialmente, a curva representa o enchimento do poço, totalizando 0,1667 h (10 min). A partir do enchimento completo, inicia-se a redução do NA dentro do poço. Com o gradiente hidráulico inicial elevado e a superfície de infiltração igual à superfície interna total do poço, a redução da coluna de água é acentuada nos primeiros minutos com tendência de redução com o tempo.

Na análise numérica, o tempo de enchimento foi considerado o mesmo do ensaio em campo. A partir do enchimento, a curva do resultado numérico apresenta boa concordância com o resultado experimental, tendo maior divergência somente no tempo final de infiltração.

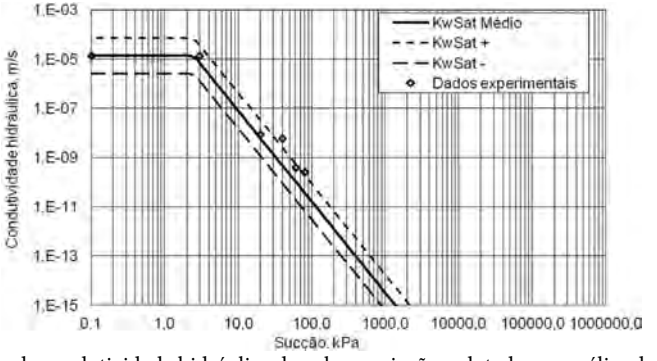


Figura 5. Função de condutividade hidráulica do solo e variações adotadas na análise de sensibilidade.

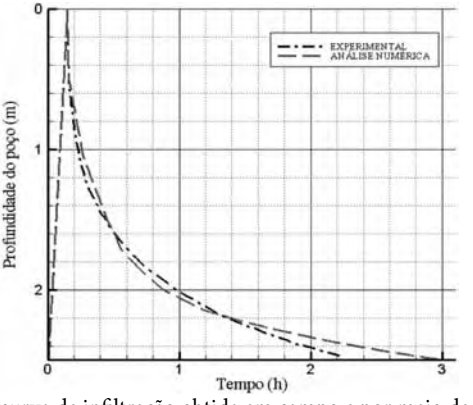


Figura 6. Comparação da curva de infiltração obtida em campo e por meio de análise numérica.

5 Resultados

A Tabela 4 apresenta todos os valores de desempenho (i.e. tempo de infiltração) correspondentes a cada cenário analisado para a geração dos diagramas tornado evento probabilísticos. Esses resultados serão analisados a seguir com o auxílio dos diagramas construídos.

As Figuras 7 e 8, referentes às análises do NA profundo e raso dos poços grande e pequeno respectivamente, mostram o efeito da alteração das propriedades do solo no evento de infiltração. As Figuras 9 e 10 apresentam os diagramas tornado obtidos com as análises do poço grande e considerando o NA profundo e raso, respectivamente. Os diagramas da esquerda correspondem ao diagrama tornado evento determinístico, em que é considerada a variabilidade de uma única propriedade por vez. O tamanho das barras corresponde à influência da variabilidade da propriedade do solo na variação do tempo de infiltração. Quanto maior o tamanho da barra, maior é o impacto no resultado.

Pode-se observar que a permeabilidade saturada teve importante influência no tempo de infiltração. O incremento no valor de k_{sat}^{w} alterou o tempo de infiltração total do poço grande de quase 5horas para mais de 14horas, enquanto a redução do valor médio de k_{sat}^{w} acelerou a infiltração para cerca de 0,30 horas. O valor de entrada de ar também influenciou, indiretamente, o tempo de infiltração, alterando a função de condutividade hidráulica, que foi estimada a partir da curva característica, modificando a distribuição de condutividade hidráulica no solo.

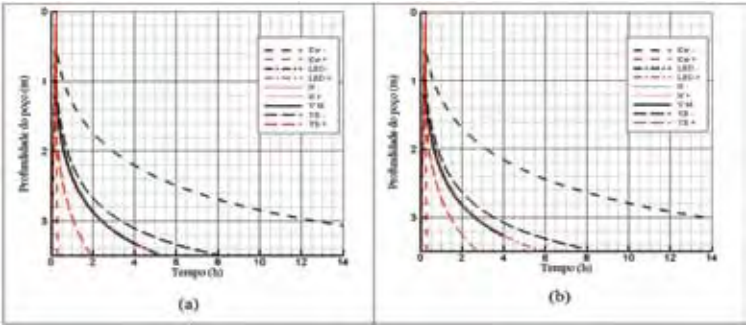


Figura 7. Curva de infiltração para o poço grande: a) NA profundo; b) NA raso.

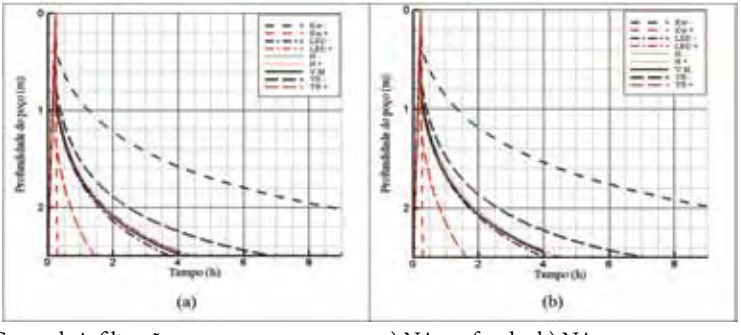


Figura 8. Curva de infiltração para o poço pequeno: a) NA profundo; b) NA raso.

Os dois diagramas (i.e. determinístico e probabilístico) mostram que a condutividade hidráulica saturada foi a propriedade que mais causou impacto no tempo de infiltração. O valor de entrada de ar foi a segunda propriedade de maior impacto, e a inclinação da curva característica foi a propriedade de menor impacto.

Quando as propriedades são combinadas (evento probabilístico), os impactos das demais propriedades, excluindo a condutividade hidráulica saturada, são semelhantes. Os

diagramas referentes aos parâmetros de desempenho de 70% e 85% do volume infiltrado mostram que, quanto maior o tempo, maior é o impacto causado pela variabilidade da propriedade, devido à redução natural da infiltração com o tempo, mesmo quando considerados somente os valores médios.

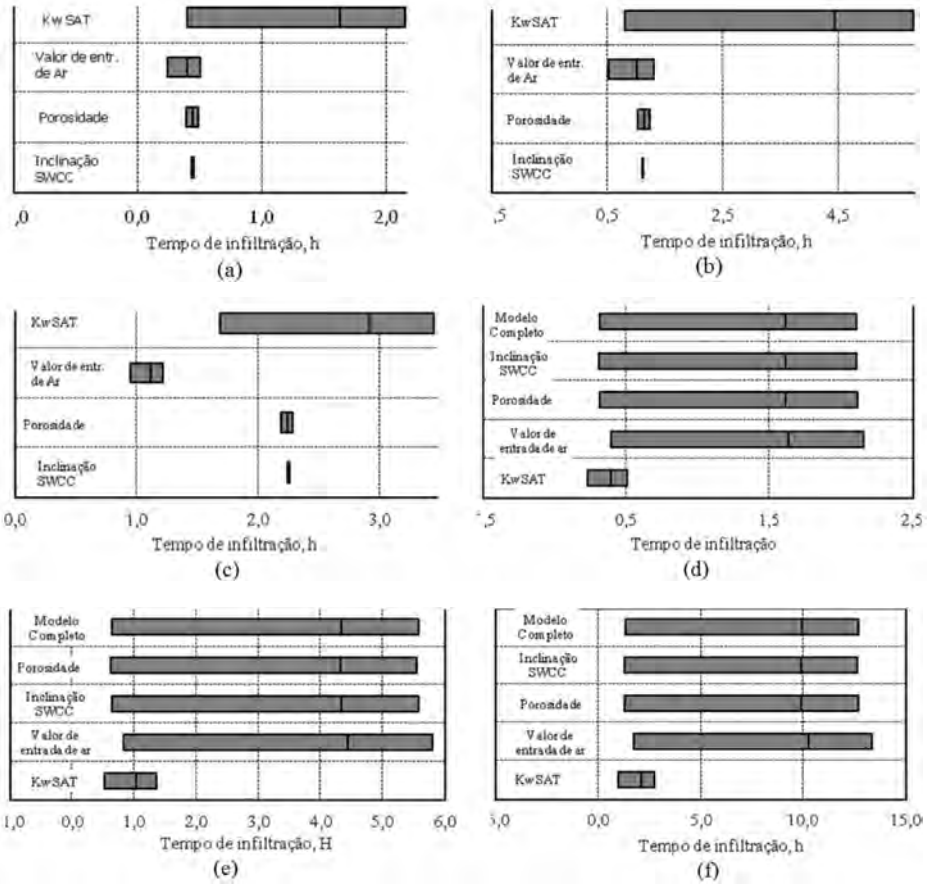


Figura 9. Diagramas tornado para o poço grande e NA profundo: a) diagramas tornado evento determinístico para 50% de infiltração; b) 70%; c) 85%; d) diagramas tornado evento probabilístico para 50% de infiltração; e) 70%; f) 85%.

Podem-se fazer as seguintes afirmações com base nos resultados obtidos, sendo algumas óbvias e outras nem tanto:

- quanto maior a permeabilidade, menor o tempo de infiltração, sendo esta a propriedade com maior impacto no desempenho dos poços;
- quanto maior a porosidade, menor o tempo de infiltração, devido ao aumento do volume de armazenagem – o impacto da porosidade, no entanto, é considerado baixo;
- quanto maior o valor de entrada de ar, menor o tempo de infiltração, sendo este efeito atribuído não só ao papel da curva característica solo-água em si, mas também ao aumento do intervalo de sucções em que se mantém a permeabilidade saturada.

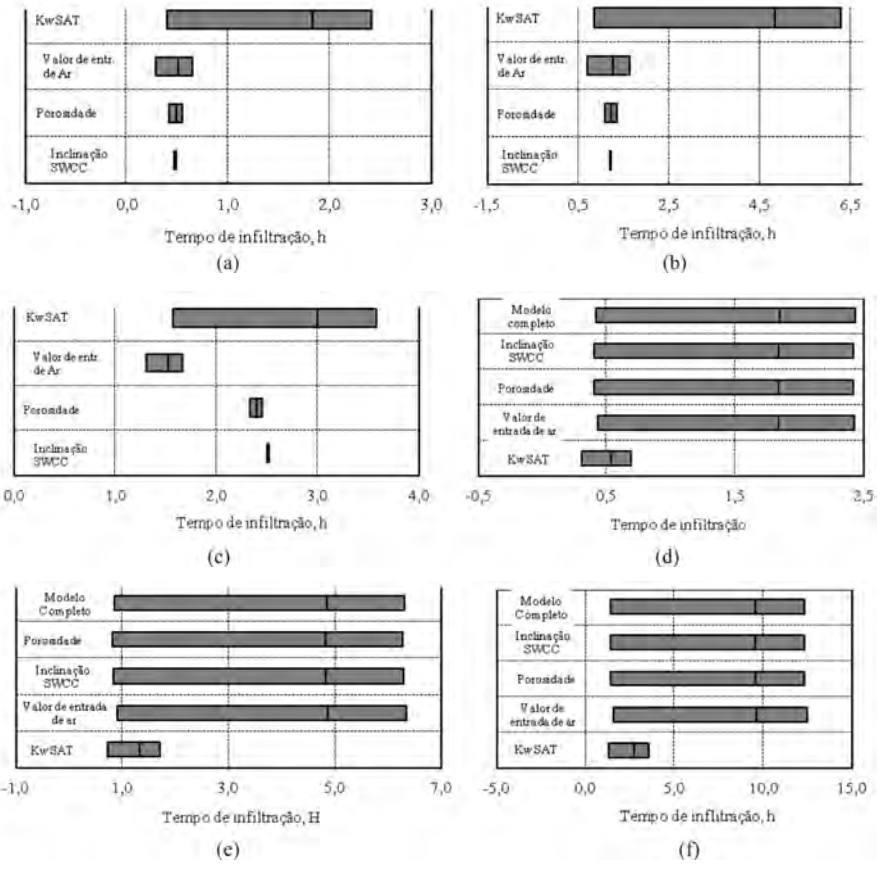


Figura 10. Diagramas tornado para o poço grande e NA raso: a) diagramas tornado evento determinístico para 50% de infiltração; b) 70%; c) 85%; d) diagramas tornado evento probabilístico para 50% de infiltração; e) 70%; f) 85%.

A influência da inclinação da curva característica solo-água no tempo de infiltração não apresenta resultados consistentes para qualquer cenário. Em certas situações, o aumento da inclinação conduz a uma diminuição e em outros a um aumento no tempo de infiltração. Pode-se afirmar, no entanto, que o impacto desta propriedade é muito reduzido.

Os resultados do poço pequeno foram semelhantes aos do poço grande. A permeabilidade saturada também foi a propriedade de maior impacto, e as demais tiveram impactos semelhantes ao impactos causados no poço grande. A diferença observada entre as duas geometrias ficou resumida no tempo de infiltração como sendo de aproximadamente 5 horas no poço grande e aproximadamente 4 horas no poço pequeno, considerando os valores médios das propriedades.

As Figuras 11 e 12 apresentam os diagramas tornado do poço pequeno para as duas profundidades de NA.Não houve diferença considerável entre as análises nos casos com NA profundo e NA raso. Mas pode-se observar claramente que, no caso do NA raso, o tempo de infiltração é sempre ampliado, nos diversos cenários analisados.

Com relação à adoção, como parâmetro de desempenho, do tempo de infiltração para três diferentes porcentagens de volume de infiltração, pode-se afirmar que todos os três tempos selecionados oferecem resultados equivalentes no que se refere à importância relativa de cada parâmetro. Pode-se observar, no entanto, que a incerteza acerca do desempenho do poço cresce quando maiores porcentagens de infiltração são adotadas como parâmetro de avaliação. Esse resultado é explicado pela propagação das incertezas originadas das propriedades no domínio do tempo.

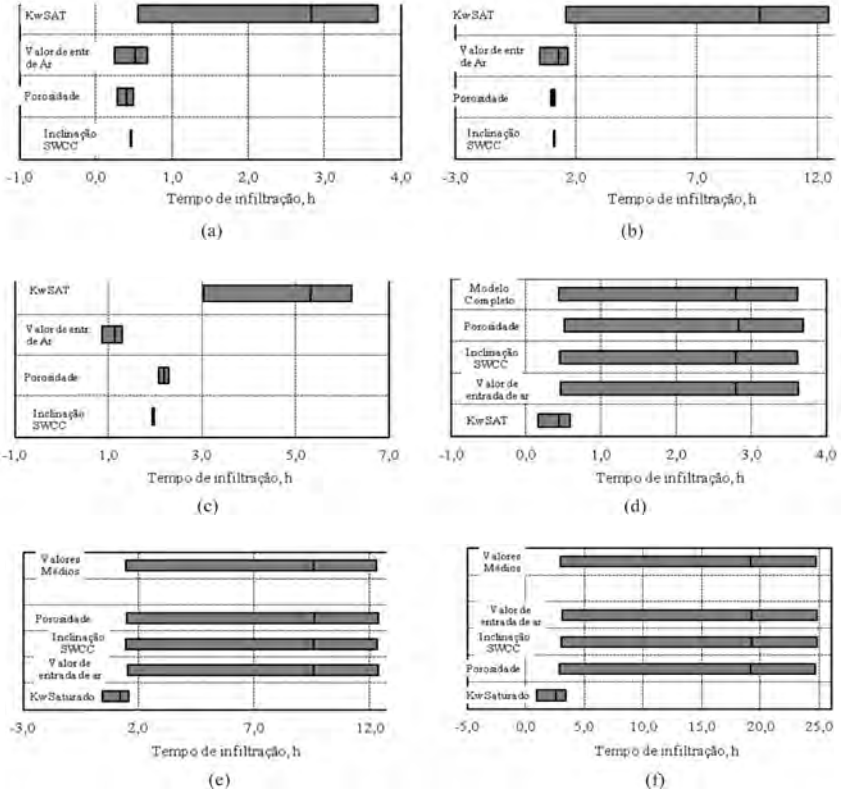
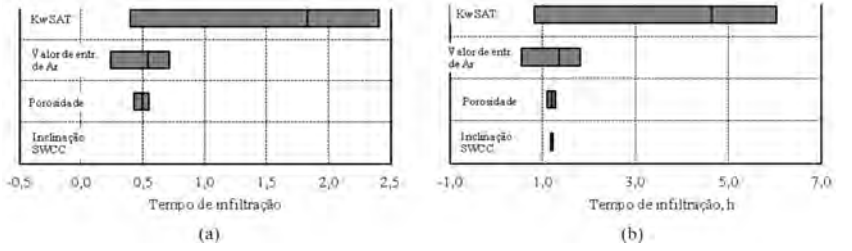


Figura 11. Diagramas tornado para o poço pequeno e NA profundo: a) diagramas tornado evento determinístico para 50% de infiltração; b) 70%; c) 85%; d) diagramas tornado evento probabilístico para 50% de infiltração; e) 70%; f) 85%.



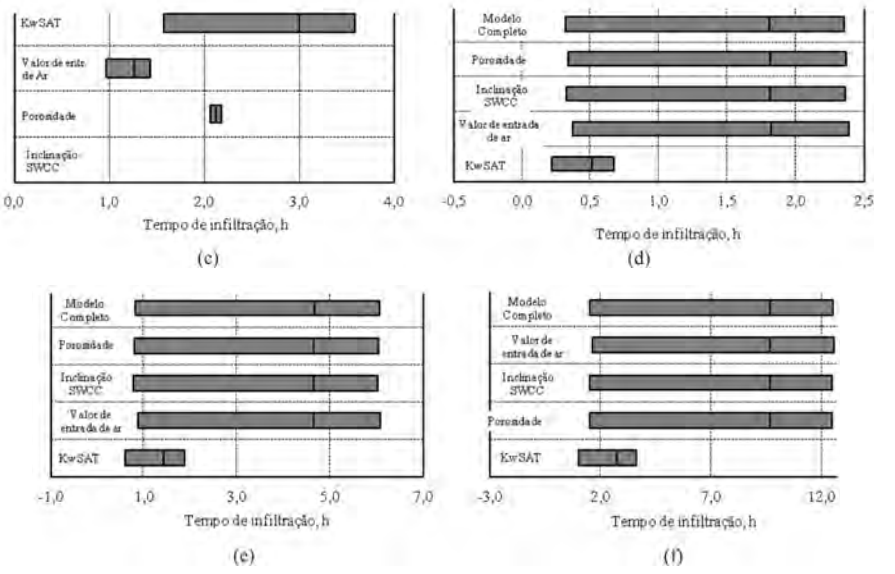


Figura 12. Diagramas tornado para o poço pequeno e NA raso: a) diagramas tornado evento determinístico para 50% de infiltração; b) 70%; c) 85%; d) diagramas tornado evento probabilístico para 50% de infiltração; e) 70%; f) 85%.

Uma análise da curva de infiltração para os dois níveis de NA é apresentada nas Figuras 13 e 14. Pode-se observar que a diferença é pequena entre as curvas de infiltração, aparentemente indicando que as duas diferentes condições de nível freático não resultam de importante diferença no processo de infiltração. Deve-se destacar, contudo, que o cenário com nível mais profundo poderia corresponder a perfis não hidrostáticos, com o solo menos úmido.

As análises de sensibilidade apresentadas também foram realizadas na região onde ocorrem os solos residuais de granulito. Os detalhes dessas análises estão apresentados em Garcês (2010). Cabe ressaltar que, considerando apenas as propriedades médias e a geometria em comparação com os estudos realizados na região onde ocorrem os solos residuais de mica-xisto, o tempo de infiltração passou de pouco mais de 4 horas para cerca de 30 horas. O nível freático também apresentou maior influência nos solos residuais de granulito, como apresentado na Figura 15.

Tabela 4. Tempo de infiltração (horas) para todos os "eventos probabilísticos" analisados.

Desemp. / Tempo(h)	**Poço grande NA, Profundo**								
	K_w^{Sat}-	K_w^{Sat} +	λ_{d1}-	λ_{d1}+	n-	n+	v.m.	ψ_{b1}-	ψ_{b1}+
50%=1.75m	2,08	0,30	0,44	0,44	0,49	0,40	0,44		0,25
70%=2.45m	5,75	0,30	1,08	1,15	1,20	1,05	1,13		0,56
85%=2.97m	12,00	0,30	2,20	2,42	2,50	2,20	2,35		1,04

(continuação)

Desemp. / Tempo(h)	Poço grande, NA Raso								
	K_w^{Sat}-	K_w^{Sat} +	λ_{d1}-	λ_{d1}+	n-	n+	v.m.	ψ_{b1}-	ψ_{b1}+
50%=1.75m	2,25	0,30	0,51	0,48	0,51	0,42	0,46	0,60	0,30
70%=2.45m	6,15	0,30	1,25	1,23	1,29	1,12	1,20	1,54	0,72
85%=2.97m	13,00	0,30	2,55	2,64	2,63	2,36	2,50	3,39	1,38
Desemp. / Tempo(h)	**Poço Pequeno, NA Profundo**								
	K_w^{Sat}-	K_w^{Sat} +	λ_{d1}-	λ_{d1}+	n-	n+	v.m.	ψ_{b1}-	ψ_{b1}+
50%=1.25m	2,15	0,30	0,46	0,45	0,50	0,42	0,45	0,62	0,25
70%=1.75m	5,50	0,30	1,06	1,10	1,19	1,04	1,10	1,57	0,50
85%=2.12m	12,00	0,30	1,95	2,08	2,20	2,00	2,09	3,16	0,83
Desemp. / Tempo(h)	**Poço Pequeno, NA Raso**								
	K_w^{Sat}-	K_w^{Sat} +	λ_{d1}-	λ_{d1}+	n-	n+	v.m.	ψ_{b1}-	ψ_{b1}+
50%=1.25m	2,25	0,30	0,49	0,49	0,52	0,44	0,49	0,66	0,25
70%=1.75m	5,85	0,30	1,18	1,20	1,25	1,08	1,18	1,64	0,30
85%=2.12m	12,00	0,30	2,20	2,25	2,95	2,10	2,25	3,25	0,48

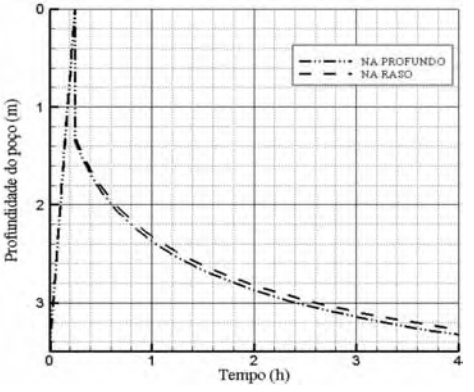


Figura 13. Comparação da curva de infiltração do poço grande nas duas profundidades de NA.

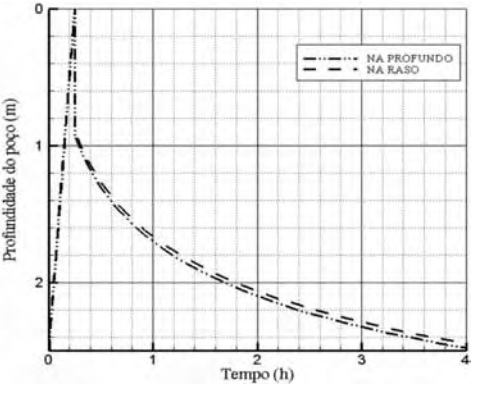


Figura 14. Comparação da curva de infiltração do poço pequeno nas duas profundidades de NA.

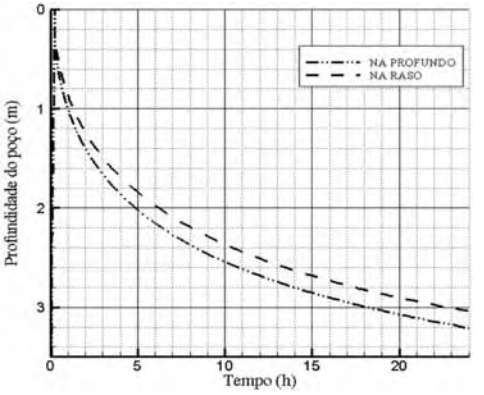


Figura 15. Comparação da curva de infiltração do poço grande nas duas profundidades de NA para o solo de formação granulítica.

6 Considerações finais

Foram apresentados neste capítulo resultados de análises de sensibilidade do desempenho de poços de infiltração à variabilidade de vários parâmetros do problema. As análises de sensibilidade foram realizadas com a variação dos parâmetros do solo dentro de valores que representam o melhor conhecimento dos parâmetros.

Um modelo numérico foi utilizado para obter o tempo de infiltração correspondente a 50%, 70% e 85% da lâmina de água no poço. A sensibilidade do desempenho do poço aos parâmetros do solo foi mais bem visualizada com a utilização de diagramas tornado. Dois tipos de diagramas tornado foram utilizados: diagrama tornado evento determinístico e diagrama tornado evento probabilístico. A comparação entre esses dois diagramas mostrou-se uma análise importante devido à correlação da variabilidade das propriedades que interferem no resultado.

A condutividade hidráulica saturada foi, em todos os casos, a propriedade do solo que causou maior impacto no desempenho dos poços de infiltração. O valor de entrada de ar é a segunda propriedade de maior impacto, quando não é considerada correlação entre as propriedades, pois, nesse caso, o valor de entrada de ar, a inclinação da curva característica e a porosidade têm impactos semelhantes. Em outras palavras, quando é eliminada a incerteza de cada uma dessas propriedades e mantidas as demais, a incerteza global do modelo não se altera expressivamente.

A análise considerando o poço grande e o poço pequeno não mostrou diferença na sensibilidade do desempenho à variabilidade dos parâmetros. O tempo de infiltração do poço pequeno foi maior devido à menor carga hidráulica nesse poço. A área de influência do poço menor foi diferenciada do poço maior por estar mais distante do lençol freático; porém, a profundidade do lençol freático não influenciou nos resultados de desempenho.

A curva de infiltração do solo de formação granulítica comprovou o impacto que a condutividade hidráulica saturada causa no processo de infiltração. O tempo de infiltração de pouco mais de 4 horas no solo de formação de micaxistos passou para mais de 30 horas no solo de formação granulítica que possui condutividade hidráulica consideravelmente inferior (GARCÊS, 2010). O nível do NA freático também causou impacto mais significativo em comparação

ao solo de formação de micaxistos. Esses resultados comprovam a importância de análise das propriedades dos diferentes tipos de solos para dimensionamento das estruturas de infiltração.

Agradecimentos

- Universidade Federal de Goiás e Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, por oferecer suas instalações e equipamentos para o desenvolvimento desta pesquisa;
- Universidade de Brasília, por disponibilizar equipamentos de laboratório para complementação dos ensaios;
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por disponibilizar o permeâmetro triaxial para ensaio da permeabilidade não saturada;
- CNPq e FAP-DF, pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências bibliográficas

BROOKS, R. H; COREY A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Hydrology. Paper n. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27v.

CLEMEN, R. T. (1996). Making hard decisions. pacific grove, U.S.: Duxbury Press. 664p.

FEUERHARMEL, C. (2007). Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da Formação Serra Geral. Porto Alegre: UFRGS. 320 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GARCÊS, A. A. (2010). Análise do desempenho de poços de infiltração na cidade de Goiânia. Goiânia: UFG. 145 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. (2004). Soil-water characteristic curve equation with independent properties. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 130, n. 2, p. 209-212.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. (2003a). Transient embankment stability analysis using dynamic programming. *In*: CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 56th, Winnipeg, MB, Canada. Proceedings… Winnipeg: University of Manitoba Press. p. 808-814.

GITIRANA JR., G. F. N. (2005). Weather-related geo-hazard assessment model for railway embankment stability. Ph.D. Thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, 411p.

OLIVEIRA, D. R. (2003). Análise da interação solo-atmosfera durante a secagem para a argila porosa de Brasília. Brasília: UnB. 168 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, DF.

TUCCI, C. E. M. (2005). Gestão das inundações urbanas. 1. ed., São Paulo: Global Water Partnership South América. 196p.

Capítulo 21
Mapeamento da infiltração no Distrito Federal

Mateo Arenas Ríos
Newton Moreira de Souza

1 Introdução

A área demarcada do Distrito Federal (DF) abrange aproximadamente 5.800 km^2. Hoje, pouco mais de meio século depois da construção do Plano Piloto de Brasília, o DF possui 19 regiões administrativas reconhecidas pelo IBGE (Figura 1). Segundo o mais recente censo demográfico, a população é de 2.570.160 habitantes (IBGE, 2010), e a taxa de crescimento anual da população é de 2,77%, de acordo com o GDF/PDOT (2005).

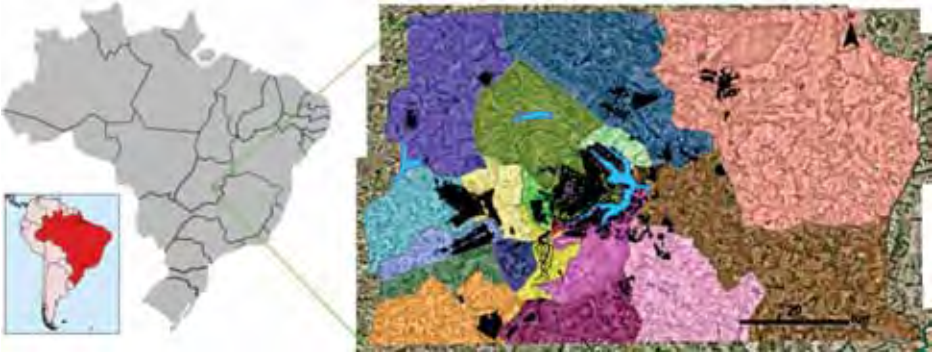


Figura 1. DF do Brasil e suas regiões administrativas, área urbana e reservatórios artificiais.

O DF abarca três regiões hidrográficas: Paraná, São Francisco e Tocantins. De acordo com SEMATEC/CODEPLAN (1994), 62,5% da área do DF contribui para a bacia do Paraná, 24,2% contribui a bacia do São Francisco e 13,3% contribui para a bacia do Tocantins. O mapa hidrográfico (Figura 2) ilustra essas três grandes bacias hidrográficas, o traçado dos canais naturais e reservatórios artificiais.

A grande quantidade de traços hidrográficos reflete o intenso fraturamento do sistema litológico do DF. Isso, somado à alta permeabilidade da maioria dos solos, faz do DF uma região onde as águas subterrâneas têm importante contribuição no abastecimento, cuja existência se deve às propriedades de infiltração do substrato na região, encontrando dois domínios de fluxo: domínio poroso e domínio fraturado.

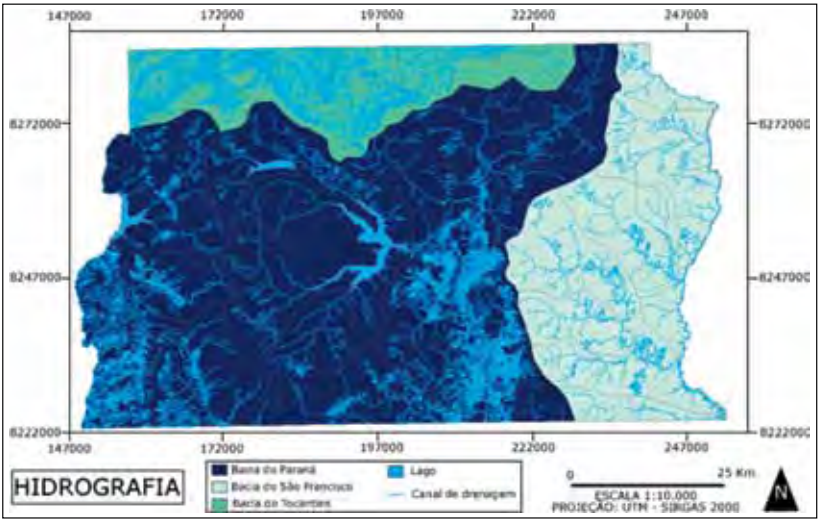


Figura 2. Carta hidrográfica do DF (TERRACAP, 2010).

1.1 Domínio poroso

O domínio poroso é representado pelo material inconsolidado, sendo o fluxo de infiltração das águas dependente desse material e é controlado pela geomorfologia e pelo substrato rochoso subjacente. Há diversidade de classes de variada continuidade lateral, tais como aquíferos livres, suspensos e sistemas híbridos.

As características de permeabilidade e espessuras dos domínios porosos são importantes, pois, além de controlarem a recarga do fissural, têm papel preponderante na infiltração das águas pluviais e suas implicações em situações de risco, como os processos erosivos e inundações. Esses aquíferos (Figura 3) apresentam vazões menores que 800 L/h e permeabilidades que variam de 10^{-5} m/s a menores 10^{-9} m/s (Tabela 1) e, embora sejam suscetíveis à contaminação por agentes externos, são aproveitados com uso de poços rasos.

Tabela 1. Aquíferos do domínio poroso (adaptado de FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998).

Unidade	P1	P2	P3	P4
Permeabilidade média (m/s)	10^{-5} - 10^{-6}	10^{-7} - 10^{-8}	10^{-8} - 10^{-9}	$<10^{-9}$

As unidades P1, P2, P3 e P4 estão ordenadas pela sua capacidade de infiltração. A unidade P1 corresponde a áreas de baixa declividade das porções mais elevadas das chapadas onde ocorrem areias quartzosas profundas e latossolos espessos, em geral vermelho escuro. A unidade P2 ocorre nas áreas de dissecação intermediária e possui declividades um pouco mais acentuadas que as anteriores e presença de latossolos de espessura média. A unidade P3 corresponde às áreas de transição das chapadas para área dissecadas onde o substrato rochoso composto de metarritimitos argilosos e solos de menor permeabilidade limitam a capacidade de infiltração. A unidade P4 de menor capacidade de infiltração corresponde às regiões

de relevo dissecado onde ocorrem solos rasos como os cambissolos e podzólicos ou mesmo afloramentos rochosos.

1.2 Domínio fraturado

O domínio fraturado é caracterizado pelos meios rochosos, onde a água ocupa o espaço das fraturas, microfraturas, diaclasas, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. A hidrodinâmica é muito variável em função do tipo de rocha. O principal fator que controla esse aspecto é a densidade de descontinuidades do corpo rochoso.

Esses aquíferos (Figura 4) são aproveitados mediante poços tubulares profundos, e as águas subterrâneas desse domínio apresentam atenuada exposição à contaminação, uma vez que o domínio poroso sobreposto funciona como filtro depurador natural, protegendo a qualidade das águas mais profundas. A recarga do domínio fraturado (Tabela 2) se dá mediante o fluxo vertical e lateral de águas de infiltração a partir da precipitação pluviométrica. A forma do relevo é um importante fator controlador das principais áreas de recarga regional.

Tabela 2. Aquíferos do domínio fraturado (adaptado de FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998).

Unidade	Araxá	A	Bambuí	R4	F	PPC	R3/Q3	S/A	F/Q/M
Vazão média (m^3/h)	3,1	4,3	5,2	6,14	7,5	9,1	12,2	12,7	33

Araxá: Xistos e quartzitos subordinados; A: Ardósias; Bambuí: Metassiltito argiloso de muito baixo grau metamórfico; R4: Metarritmito argiloso; F & F/Q/M: Filitos variados com contribuição restrita de quartzitos, calcifilitos e mármores finos; PPC: Pelítica com ardósias e metassiltitos argilosos; R3/Q3: Metarritmitos arenosos e quartzitos; S/A: Metassiltitos e ardósias.

2 Caracterizando a infiltração em escala regional

Conjuntos de dados de campo e laboratório são analisados para aproximar as características do substrato de uma zona de projeto de engenharia. Quanto maior é a área, maior será a quantidade de amostras necessárias para garantir qualidade na caracterização da zona de trabalho.

Numa região de magnitude como a do DF, é inviável executar uma campanha de ensaios de campo, amostragens e ensaios de laboratório de alta resolução devido aos custos e à quantidade de trabalho que implicaria. Isso desafia o engenho para explorar técnicas de medição indireta que permitam extrair informação de grandes conjuntos de dados secundários para inferir a informação de interesse. As bases cartográficas são fontes de dados de relevância para projetos de engenharia, o potencial dos conjuntos de informações disponíveis é ainda mais aproveitado mediante o uso de técnicas de geoprocessamento. A escolha dos dados secundários e dos métodos de inferência deve ter fundamentos físicos e matemáticos coerentes com a realidade da zona de trabalho, e os resultados inferidos devem ser validados com informação existente da região.

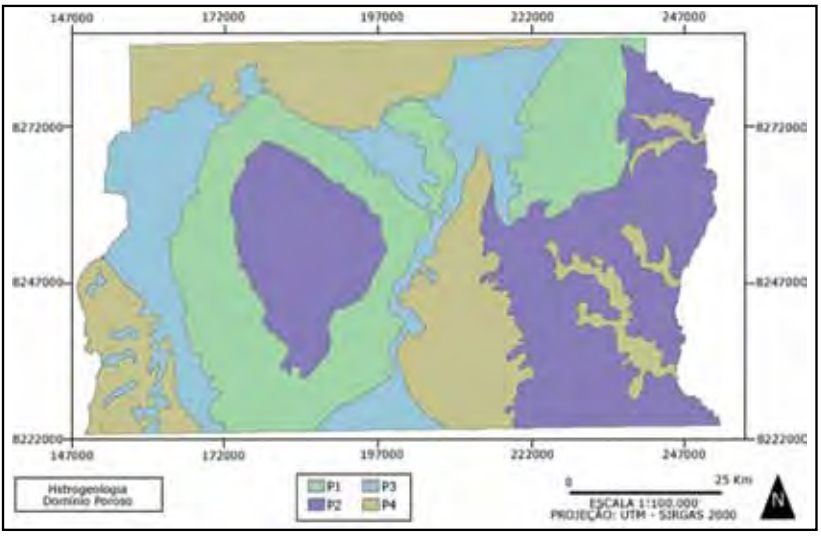


Figura 3. Carta hidrogeológica do domínio poroso do DF (adaptado de FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998).

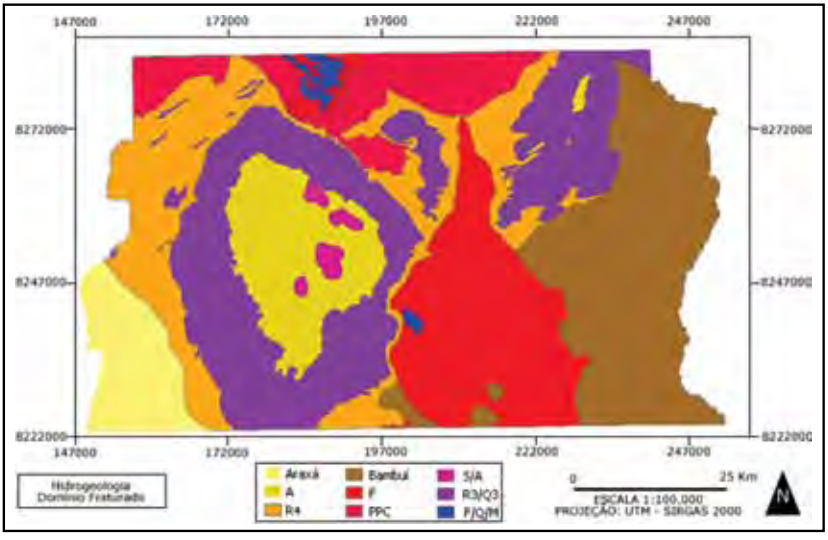


Figura 4. Carta hidrogeológica do domínio fraturado do DF (adaptado de FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998).

Na literatura científica, é possível encontrar parâmetros físicos que demonstram ter relação com as feições do terreno. Duas feições, a densidade de drenagem (*DD*) e a Rugosidade do relevo (*Rug*), animam a curiosidade devido às relações que têm sido encontradas entre essas e as características do meio físico (SPEIGHT, 1976; ZÃVOIANU, 1978; SOARES e PIO FIORI, 1978). Na Tabela 3, são descritas a densidade de drenagem (*DD*) e a Rugosidade do relevo (*Rug*).

Tabela 3. Densidade de drenagem e rugosidade do relevo.

Parâmetro	Definição	Relações com o meio físico
Densidade de drenagem [*DD*]	Comprimento dos elementos de drenagem por unidade de área [m/m^2].	Maior *DD* associada a: • maior transporte de material; • menor potencial de infiltração; • maior fragmentação do substrato; • maior precipitação.
Rugosidade do relevo [*Rug*]	Complexidade geométrica do terreno, avaliada pela quantidade de microfeições do relevo por unidade de área.	Maior *Rug* associada a: • maior resistência ao intemperismo; • menor potencial de infiltração; • menor espessura dos solos; • menor grau de plasticidade dos maciços rochosos (entendendo por plasticidade a capacidade de um material ser deformado sem ruptura).

Tentativas de obtenção de índices para expressar a densidade de drenagem são feitas desde há mais de um século (PENCK, 1894). Contemporaneamente ainda se trabalha para esse fim (TUCKER *et al.*, 2001; SHAHZAD e GLOAGUEN, 2011). Da mesma forma, a rugosidade do relevo pode ser expressa de muitas maneiras (ROMÃO e SOUZA, 2007; HENGL e REUTER, 2009; GROHMANN *et al.*, 2011). Essa linha de estudos é conhecida como geomorfometria (HENGL e REUTER, 2009) e ainda não há consenso na comunidade científica sobre os índices mais satisfatórios para descrever a densidade de drenagem (*DD*) e a rugosidade do relevo (*Rug*).

No DF, ARENAS-RÍOS (2012) desenvolveu estimadores de *DD* e *Rug* fundamentados nos conceitos da geometria fractal, gerando cartas (Figuras 5 e 6) que demonstraram relações com as condições pedológicas explícitas na carta de solos do DF (Figura 7). Dessas cartas derivou-se uma fórmula (Equação 1) que permite comparar qualitativamente a permeabilidade dos solos do DF:

$$(K[AQ] \geq K[LVe] \geq K[LVa]) > K[HI] > (K[PV] \geq K[Cb]) > K[Outros] \quad (1)$$

Na simbologia da Equação 1, K[*i*] representa a permeabilidade ou potencial de infiltração da água no tipo de solo "*i*", onde AQ = areias quartzosas, LVe = latossolo vermelho escuro, LVa = latossolo vermelho amarelo, HI = solos hidromórficos, PV = podzólicos, Cb = cambissolos e Outros = outros tipos de solo (em geral derivados de carbonatos). Essa equação possui validade numa escala 1:100.000 e permite ter uma noção regional do contraste entre a capacidade de escoamento, o potencial de infiltração ou retenção de água entre vários tipos de solo na região. Deve-se observar que, apesar de os solos hidromorficos terem ficado, pela análise das cartas, com permeabilidade menor que a dos latossolos, e maior que as do podzólicos e cambissolos, tal situação não se verifica em campo onde os solos hidromorficos são caracterizados pela baixa drenabilidade, podendo ser considerados os de menor capacidade de infiltração. Essa contradição se deu pelo fato de as características de rugosidade de relevo e densidade de drenagem dos locais onde ocorrem esses solos hidromorficos serem semelhantes as dos locais onde ocorrem os solos mais permeáveis, sendo a sua condição de baixa

drenabilidade definida por condicionantes locais e não regionais. Assim, para eliminar tal contradição, os solos hidromórficos podem ser inseridos nas cartas de potencial de infiltração como pertencentes à classe de "muito baixo" potencial de infiltração.

Com base nas cartas de *DD* e *Rug* (Figuras 5 e 6), foi possível criar duas cartas do potencial de infiltração do DF usando técnicas diferentes (lógica Booleana e álgebra de mapas). As cartas de infiltração (Figuras 8 e 9) foram classificadas segundo as categorias apresentadas na Tabela 4, as quais são fundamentadas nas informações da Tabela 1.

Tabela 4. Categorias das cartas de infiltração do DF.

Cor	Potencial de infiltração	Velocidade média
Mb	Muito baixo	$< 10^{-8}$ m/s
Ba	Baixo	10^{-7} a 10^{-8} m/s
Me	Médio	10^{-6} a 10^{-7} m/s
Al	Alto	10^{-5} a 10^{-6} m/s

A carta de infiltração fundamentada na lógica Booleana foi estimada mediante a revisão da correspondência espacial entre as categorias das cartas de *DD* e *Rug*. Foram atribuídas classes de potencial de infiltração segundo uma operação lógica entre as classes de *DD* e *Rug*. Por exemplo: <se *DD* é Nula **e** *Rug* é Plano, então o potencial de infiltração é Alto>, e assim por diante. O critério é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Critério de uso da lógica Booleana para estimar a carta do potencial de infiltração

		Densidade de Drenagem			
		Nula	**Baixa**	**Média**	**Alta**
Rugosidade	**Plano**	Al	Me	Ba	Ba
	Ondulado	Me	Me	Ba	**Mb**
	Levemente Rugoso	Ba	Ba	Ba	**Mb**
	Rugoso	Ba	Ba	**Mb**	**Mb**
	Muito Rugoso	**Mb**	**Mb**	**Mb**	Mb

A estimação mediante álgebra de mapas implementou uma fórmula que propôs definir o potencial de infiltração como função da densidade de drenagem (*DD*) e da rugosidade (*Rug*) de acordo com a Equação 2:

$$x = a.DD.Rug + b \quad (2)$$

em que $\boldsymbol{x}$ é o expoente do coeficiente de infiltração, baseado nos valores da Tabela 1, isto é, $10^{-5}<10^{-x}<10^{-10}$m/s, ou seja, $5<\boldsymbol{x}<10$; $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{b}$ são coeficientes de ajuste regional (para o DF, a=1,89, $\boldsymbol{b}$=5).

Para se encontrarem os coeficientes de ajuste regional $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{b}$, inicialmente se identificaram os valores mínimos e máximos de *DD* e *Rug* (*DD:* mín. = 0, máx. = 1,35; *Rug:* mín = 1; máx = 1,96), os quais são detalhados por ARENAS-RÍOS (2012). Com base nesses valores, os coeficientes $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{b}$ são calculados pelas Equações 3 e 4, as quais seguem a lógica de que para

os valores mínimos de *DD* e *Rug* temos as maiores velocidades de infiltração ($\boldsymbol{x} = 5$) e para os valores máximos de *DD* e *Rug* temos as menores velocidades de infiltração ($\boldsymbol{x} = 10$).

$$se\ x = 5 \rightarrow DD, Rug = \min \rightarrow 5 = a(0)(1) + b \rightarrow b = 5 \quad (3)$$

$$se\ x = 10 \rightarrow DD, Rug = \max \rightarrow 10 = a(1.35)(1.96) + 5 \rightarrow a = 1.89 \quad (4)$$

A carta estimada mediante álgebra de mapas é apresentada na Figura 9. O fatiamento de classes foi feito conforme as velocidades médias de infiltração apresentadas na Tabela 4.

A validação das cartas de infiltração (Figuras 8 e 9) foi feita mediante comparação ponto a ponto, tabulação cruzada, com as cartas de solos (Figura 7) e da hidrogeologia do meio poroso (Figura 3), obtendo coerência satisfatória entre os dados modelados e os dados da base cartográfica (ARENAS-RÍOS, 2012).

3 Considerações finais

Determinar as características da infiltração da água nos solos em escala regional não é fatível mediante medições diretas em detalhe, devido aos custos e à quantidade de trabalho que isso implica, abrindo caminho para as inferências indiretas.

Propostas para isso podem ser as mais variadas dependendo das hipóteses e dos modelos escolhidos para executar as inferências, no caso deste trabalho foi apresentada uma abordagem fundamentada em duas feições do relevo (densidade de drenagem e rugosidade), não impondo que seja a única maneira de fazer as análises.

Os resultados propõem quatro categorias do potencial de infiltração da água nos solos do DF (alto, médio, baixo e muito baixo), variando desde 10^{-5}m/s até velocidades menores do que 10^{-8}m/s, sendo referentes ao substrato poroso da região.

Os resultados obtidos puderam ser validados por avaliação da tabulação cruzada desses com os valores de potencial de infiltração inferido dos mapas de solos e de hidrogeologia.

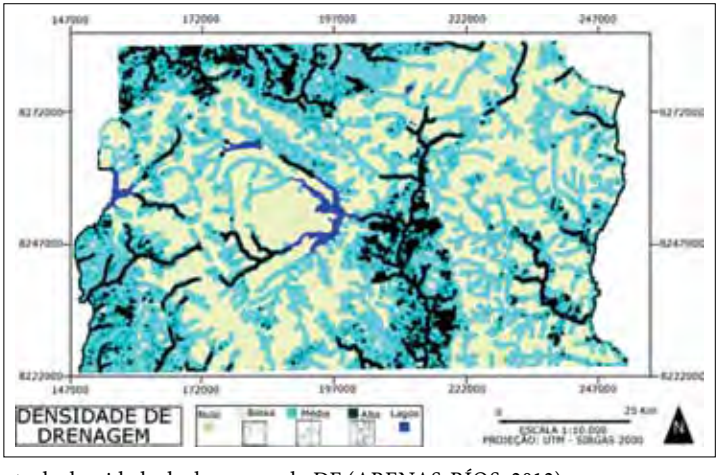


Figura 5. Carta de densidade de drenagem do DF (ARENAS-RÍOS, 2012).

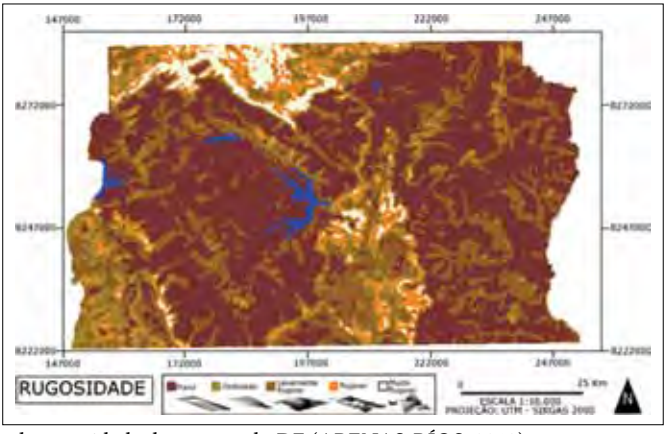


Figura 6. Carta de rugosidade do terreno do DF (ARENAS-RÍOS, 2012).

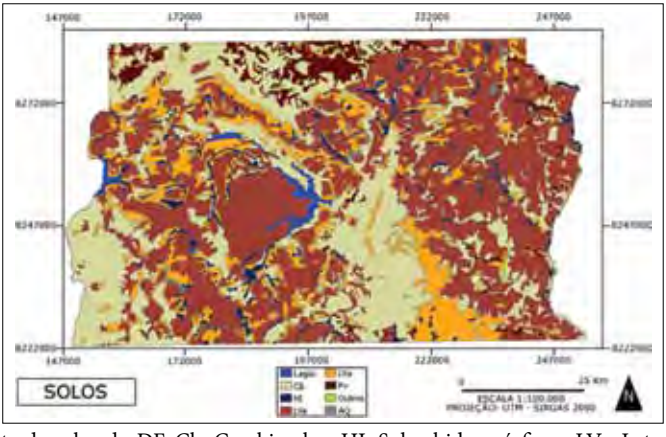


Figura 7. Carta de solos do DF. Cb: Cambissolos; HI: Solos hidromórficos; LVe: Latossolo vermelho escuro; LVa: Latossolo vermelho amarelo; PV: Podzólicos vermelhos; Outros: outros tipos de solo; AQ: Areias quartzosas (modificado de EMBRAPA, 1978).

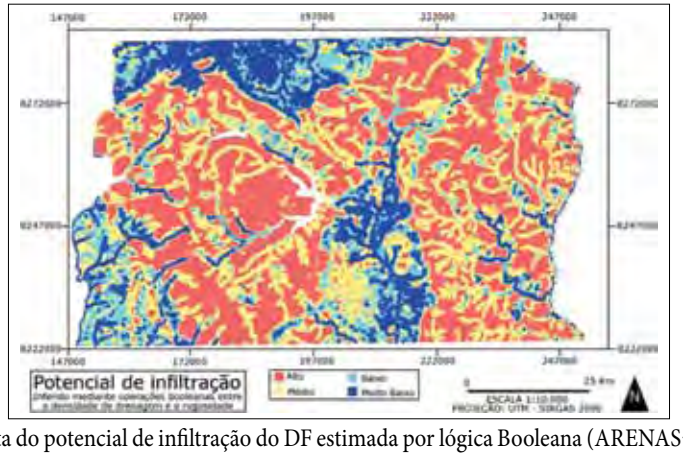


Figura 8. Carta do potencial de infiltração do DF estimada por lógica Booleana (ARENAS-RÍOS, 2012).

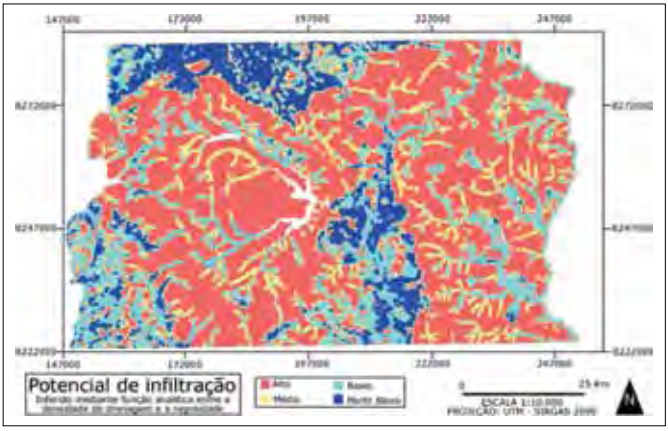


Figura 9. Carta do potencial de infiltraçãodo DF estimada por álgebra de mapas (ARENAS-RÍOS, 2012).

Referências bibliográficas

ARENAS-RÍOS, M. (2012). Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo. Brasília: UnB. 128 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Publicação G.DM-205/12.

EMBRAPA (1978). Mapa pedológico do Distrito Federal em formato digital, na escala 1:100.000. Brasília, DF. Boletim Técnico 53 "Levantamento de Reconhecimento dos solos do Distrito Federal", Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. Rio de Janeiro, RJ. 455 p.

FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. (1998). Geologia do Distrito Federal 1:100.000. *In:* FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. (Eds.). Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. v. 1, Parte I, Brasília, DF: IEMA/SEMATEC/UnB. p. 1-87.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (2005). Revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal. Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação, Brasília, DF, 28 p.

GROHMANN, C. H.; SMITH, M. J.; RICCOMINI, C. (2011). Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 49, n. 4, p. 1200-1213.

HENGL, T.; REUTER, H. I. (2009). Geomorphometry: concepts, software and applications. Amsterdam, Holanda: Elsevier. 775 p.

IBGE (2010). Sinopse do censo demográfico 2010. Disponível na internet: http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/. Acesso em: 06 jun. 2012.

PENCK, A. (1894). Morphologie der Erdoberfläche. v. 1. Ed. J. Engelhorn, Stuttgart, Alemânia. p. 33-95.

ROMÃO, P. de A.; SOUZA, N. M. (2007). Compartimentação do terreno com base na entropia do relevo – Modelagem da região de Goiânia – GO. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 6, 04 a 06 junho de 2007, Uberlândia, MG. Uberlândia, ABGE, p. 487-501.

SEMATEC/CODEPLAN (1994). Mapa das unidades hidrográficas do DF.

SHAHZAD, F.; GLOAGUEN, R. (2011). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology. Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. Computers & Geosciences, v. 37, p. 250-260.

SOARES, P. C.; PIO FIORI, A. (1978). Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Boletin geográfico, v. 258/259, p. 35-59.

SPEIGHT, G. J. (1976). Landform pattern description from aerial photographs. Photogrammetria, v. 32, p. 161-182.

TERRACAP (2010). Base cartográfica digital 1:10.000 do Distrito Federal.

TUCKER, G. E.; CATANI, F.; RINALDO, A.; BRAS, R. L. (2001). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. Geomorphology, v. 36, p. 187-202.

ZÃVOIANU, I. (1978). Morphometry of drainage basins. 2nd ed. Amsterdam, Holanda: Elsevier. 251 p.

Capítulo 22
Análise e gestão do risco

Hernán Eduardo Martínez Carvajal
Jorge Esteban Alarcón Guerrero
André Pacheco de Assis

1 Introdução

Foi na década de 1950 que, pela primeira vez, propôs-se um modelo para a estimação do risco (MENG *et al*., 2010). Somente em 1975, com o Rasmussen Report (U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), foi apresentada a primeira metodologia PRA (*Probabilistic Risk Analysis*) desenvolvida para a indústria nuclear, constituiu-se na semente que gerou a forma como hoje é vista a análise do risco.

Entretanto, na engenharia civil, somente nas últimas duas décadas tem sido comum a inclusão completa ou parcial da gestão do risco em diferentes tipos de problemas. As aplicações mais comuns referem-se: ao zoneamento sísmico; aos estudos de gestão do território, tais como zoneamentos de encostas em relação aos problemas de escorregamentos ou aos zoneamentos de regiões de inundação, e aos estudos de planejamento e administração urbana. Porém, há alguns trabalhos que visam à gestão do risco em algumas obras de grande porte, tais como barragens e túneis. Em termos gerais, obtém-se maior sucesso na gestão do risco aplicada ao primeiro grupo do que ao segundo. No último, o tema risco é um tema relativamente novo.

Cabe neste momento abrir espaço para incluir algumas definições clássicas que permitirão esclarecer o significado dos diferentes termos usados neste capitulo. A Ameaça (A) é definida como a situação ou condição que apresenta um potencial de prejuízo humano, de danos à propriedade, de danos ao meio ambiente, de perdas econômicas ou atrasos na finalização da obra. O Risco (R) é a combinação da frequência de ocorrência de uma ameaça determinada e as consequências de sua ocorrência. Tais consequências, de forma geral, são consideradas dentro do que se conhece como vulnerabilidade (V), na qual estão envolvidos tanto o conceito de grau de exposição como o de fragilidade.

Como definições derivadas das anteriores aparecem: (i) Análise do risco (AR), que não é outra coisa mais que o processo estruturado no qual é identificada a probabilidade e extensão das consequências adversas geradas por uma dada atividade; por outra parte está a (ii) Gestão do risco (GR), que é o processo que inclui identificação, avaliação, análise, eliminação, mitigação e controle do risco. Em geral, para todos os problemas de engenharia civil poderia ser usada a mesma Metodologia de Gestão do Risco (MGR); porém, há diferenças que devem ser consideradas no momento da análise do risco. Para estabelecer essas diferenças, serão se-

parados dois grandes grupos. O primeiro refere-se aos empreendimentos de zoneamento de encostas e sísmicos, e o segundo refere-se aos empreendimentos de túneis e às demais obras de grande porte. Essas diferenças estão resumidas na Figura 2.1.

TÚNEIS E OBRAS DE GRANDE PORTE
ESCALA < 1:10.000
É possível alterar ameaça
Facilidade na modelação fenomenológica
Pouca ou nenhuma informação histórica
Boa informação geotécnica
ZONEAMENTOS, MAPAS DE RISCO E ANÁLISES
ESCALA ≥ 1:10.000
Informação geotécnica limitada
Informação de dados históricos de ocorrência de eventos
Dificuldade na modelação fenomenológica
Quase impossível alterar ameaça

Figura 1. Análise de risco para túneis vs. análise de riscos para zoneamentos.

A Figura 1 mostra que a grande diferença que deve ser considerada na análise do risco (AR) é a mudança na escala de abordagem para o estudo do problema, de forma que os zoneamentos sejam trabalhados em meso e pequena escala (1:10.000 em diante) e as obras de grande porte, como os túneis, em grandes escalas. Essa circunstância implica mudanças de aspectos que são importantes quando se quer aplicar, com sucesso, a AR. Dentre as mudanças, algumas constituem vantagens e outras desvantagens. Em relação aos projetos de túneis, são características vantajosas a possibilidade de alterar a ameaça e a relativa facilidade de modelação fenomenológica. Este última vantagem deve-se à existência de um importante avanço no conhecimento do comportamento, a essa escala, dos fenômenos associados, de modo que é possível encontrar *softwares* comerciais que permitam abordar o problema com sucesso. Porém, há aspectos que, claramente, constituem-se em desvantagens, como o fato de que, normalmente, na etapa em que é realizada a AR, além de não se ter informação histórica, não há também informação realmente útil ou esta é escassa, fazendo com que a maioria da informação geotécnica seja produzida dentro do empreendimento. Por outro lado, este último aspecto permite ao especialista definir as características da informação geotécnica que será coletada, configurando uma situação vantajosa.

Além da definição dada no início deste capítulo, há muitas maneiras de expressar, matematicamente, o risco (SOUSA, 2010; SHAHRIAR *et al.*, 2008; STURK *et al.*, 1996; EINSTEIN, 1996). Entretanto, inicialmente será apresentada na Equação 2.1 sua expressão mais simples.

$$R = P\,[A] \cdot C \tag{1}$$

em que R é o risco, P(A) é a probabilidade de ocorrência da ameaça A e C é a consequência, cuja forma mais comum de avaliá-la é por meio de uma função que permite estimar o seu custo.

São muitas as discussões referentes à gestão do risco que se encontram na bibliografia (STURK *et al.,* 1996; EINSTEIN, 1996; ESKESEN *et al.,* 2004; GUGLIELMETTI *et al.,* 2008). Em termos gerais, os especialistas coincidem em relação aos elementos que devem constituir a gestão do risco e às suas definições. Existe, porém, um desentendimento relacionado com a metodologia de gestão do risco que forneça um caminho bem definido, em que passos sejam indicados para a implementação da GR em um empreendimento civil. O anterior leva, geralmente, ao fracasso no processo da GR, um dos motivos pelos quais se paralisou a popularização e aplicação das metodologias de GR nos seu início quase duas décadas atrás (MENG *et al.,* 2010).

2 Gestão do risco

Além da definição dada pela Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo (ITA), apresentada no início do capítulo, Guglielmetti *et al.* (2008) apresentam uma definição para Gestão do Risco aplicável em projetos de obras subterrâneas que poderia se estender a projetos de engenharia civil. Segundo os mencionados autores, a GR é o processo que consiste em identificar e listar as potenciais ameaças associadas às atividades características das obras subterrâneas, atribuir uma probabilidade de ocorrência a cada ameaça, designar um índice de severidade à consequência e tomar medidas que permitam reduzir a probabilidade de ocorrência da ameaça e/ou a severidade da consequência.

Tanto as publicações de Guglielmetti et al. como aquelas da ITA (ESKESEN *et al.,* 2004) constituem o maior avanço no estado do conhecimento da GR em obras geotécnicas. As Metodologias de Gestão do Risco (MGR) têm coincidências e diferenças. De maneira geral todas coincidem, por exemplo, em relação à importância de incluir a identificação dos riscos (IR), à análise dos riscos (AR) individuais e à necessidade de comparar o risco do sistema com algum critério de aceitação (comparação que Guglielmetti et al. definem como cálculo do risco residual e a ITA como processo de determinação do risco). Por outro lado, diferem, principalmente, em relação ao momento em que a GR deve ser aplicada dentro das diferentes etapas dos empreendimentos. Para alguns autores, é importante considerar a GR tanto na etapa de projeto como nas etapas de contratação e construção. Em contraste, outros opinam que só as etapas de projeto e construção precisam da gestão do risco, deixando fora as etapas menos geotécnicas associadas aos processos de contratação. A seguir, são descritas as etapas do processo da GR segundo apresentado por Eskesen *et al.* (2004):

Etapa 1 – Projeto. Nesta etapa são indispensáveis:

1. Estabelecimento de políticas de risco;
2. Estabelecimento de critérios de aceitação do risco;
3. Determinação qualitativa do risco do projeto;
4. Análise detalhada de áreas de interesse especial ou de particular preocupação.

Etapa 2 – Licitação e Negociação do Contrato. Por se tratar de uma etapa na qual estão envolvidos não só riscos geotécnicos, mas também riscos financeiros e até mesmo variáveis políticas e sociais, alguns autores são da opinião de desconsiderá-la no processo de GR. Inclui as seguintes fases:

5. Requerimentos do edital;

6. Determinação do risco na avaliação da licitação;
7. Cláusulas de risco no contrato.

Etapa 3 – Construção. Devido, entre outras coisas, à variabilidade natural do terreno e às incertezas associadas aos modelos e às teorias de comportamento dos geomateriais, esta etapa é fundamental no processo de GR. Inclui estas fases:

8. Gestão do risco do empreiteiro;
9. Gestão do risco do dono do projeto;
10. Equipe de gestão do risco conjunto, entre o dono e o empreiteiro.

Etapa 4 – Operação. Levando em consideração que um número importante de rupturas de obras geotécnicas ocorre durante a etapa de operação do projeto, é importante considerar a GR nesta etapa, principalmente para projetos de grande porte, como túneis, barragens, construção de infraestrutura robusta em áreas de encosta, cavernas para armazenagem de substâncias perigosas ou de combustíveis, etc. Nesses casos, devem ser considerados riscos que só fazem parte do processo de operação, mas que devem ser identificados no projeto base. As fases a serem consideradas são:

11. Gestão do risco do operador;
12. Gestão do risco do dono do projeto;
13. Equipe de gestão do risco conjunto, entre o dono e o operador.

Com o intuito de apresentar de maneira mais detalhada a forma de abordar o estudo da GR, é apresentado, na Figura 2, o fluxograma das fases associadas à etapa de projeto, mencionadas anteriormente.

3 Políticas do risco

Antes de dar início a definição das políticas do risco, é necessário garantir que o especialista em risco conheça detalhadamente os principais elementos do projeto básico, tais como: planta arquitetônica, posição em relação às feições geomorfológicas mais importantes, carregamentos impostos, geometria do túnel; alinhamento vertical e horizontal preliminares; localização das galerias, dos poços e cavernas associados a, por exemplo, estações de metrô ou poços de acesso; método construtivo preliminar; modelo de comportamento geomecânico a ser considerado; caracterização geológica; topografia; interferências localizadas, entre outros.

É muito importante realizar essa atividade na etapa preliminar do projeto. O objetivo é estabelecer os lineamentos comuns para todas as partes envolvidas: dono, projetista, empreiteiro e companhia seguradora. As políticas de risco devem ser estabelecidas pelo dono do projeto, indicando, inicialmente, de maneira clara, o escopo e o objetivo da GR. Como exemplo, o escopo pode incluir:

1. risco para a saúde e seguridade dos trabalhadores, incluindo danos pessoais e, em caso extremo, perda de vidas humanas;
2. risco para a saúde e seguridade de terceiros;
3. risco para propriedades de terceiros, especificamente edifícios e estruturas existentes, edifícios de patrimônio cultural e infraestrutura superficial e subterrânea;
4. risco para o meio ambiente, incluindo possível contaminação do solo, da água e do ar, e dano à flora e fauna;

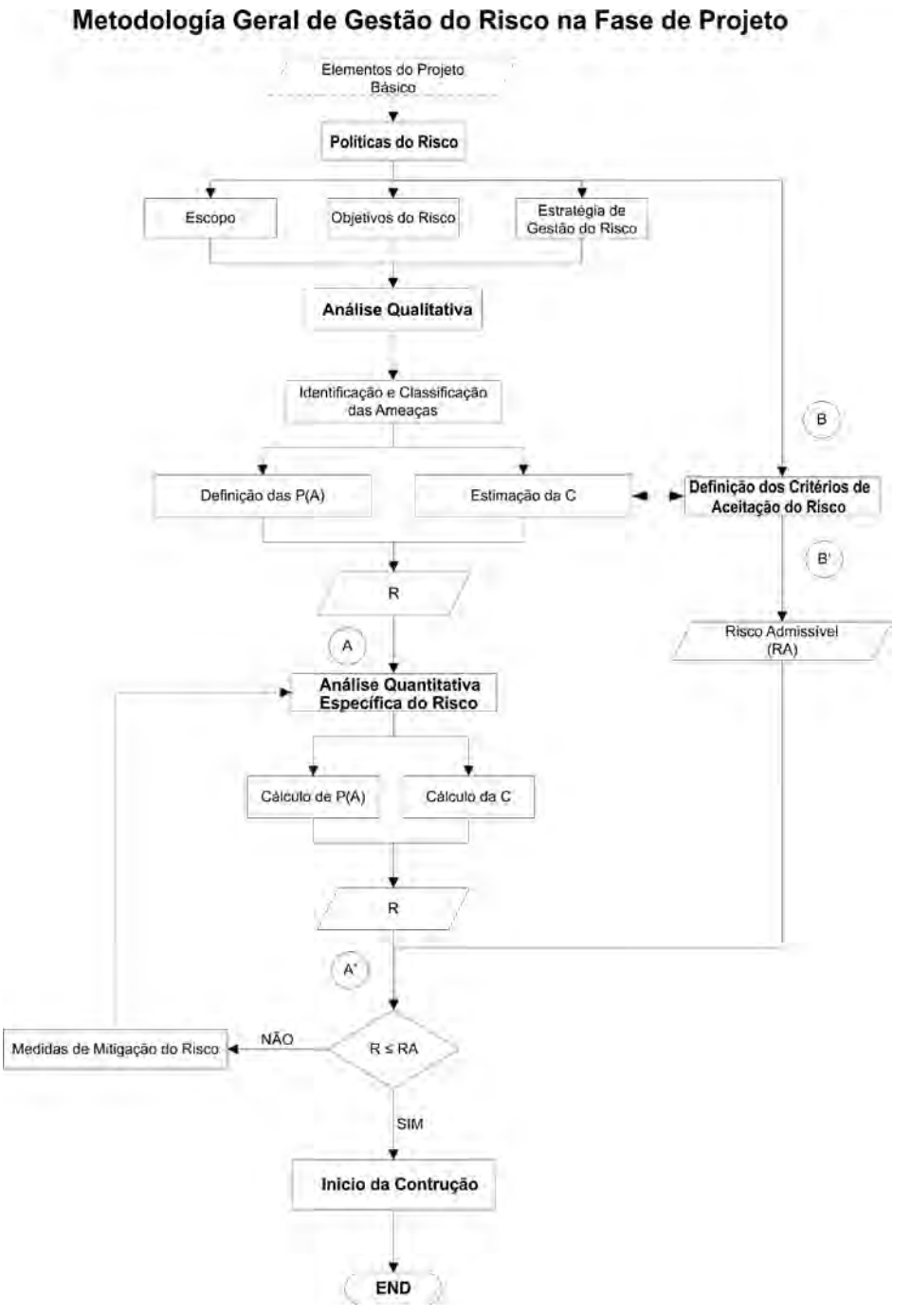


Figura 2. Metodologia geral de gestão do risco para a etapa de projeto de um empreendimento de engenharia civil.

5. risco para o dono referente ao atraso na entrega da obra;
6. risco para o dono em relação a perdas financeiras e elevação dos custos;
7. as estratégias de gestão do risco;
8. critérios de aceitação do risco.

A elaboração das políticas do risco pode indicar que a ênfase esteja focada na minimização do risco global, mediante a redução da probabilidade de ocorrência dos eventos com grandes consequências (com muitas fatalidades ou de grande impacto político). Isso deve ser feito caso o proprietário considere mais importante os eventos de baixa probabilidade com consequências elevadas em relação aos eventos de alta probabilidade de ocorrência com consequências baixas, mesmo que o risco, expressado como o produto entre a probabilidade e a consequência, seja o mesmo.

A elaboração das políticas de risco podem também incluir algumas declarações gerais sobre a distribuição do risco entre os diferentes grupos de especialistas ou de trabalho envolvidos no projeto. Para cada tipo de risco, os objetivos específicos de risco mínimo podem ser definidos, em adição ao objetivo geral do risco. Por exemplo, o público, em geral, deve ser exposto somente a um pequeno risco adicional proveniente da construção de um túnel ou de uma obra subterrânea, em comparação ao risco a que eles estão expostos como usuários de edifícios, veículos, bicicletas, transporte público e quando estão caminhando em ruas adjacentes.

4 Estratégias de gestão do risco

Como parte do processo de definição das políticas de risco, estratégias de GR devem ser adotadas. Uma estratégia recomendada é determinar o risco nas etapas de projeto e construção de acordo com a informação disponível e as decisões a serem tomadas ou revisadas em cada etapa. A seguir é apresentada uma lista básica de estratégias a serem consideradas:

1. a definição das responsabilidades de gestão do risco entre as diferentes partes envolvidas (diferentes departamentos dentro da organização do dono do projeto, consultores, empreiteiros);
2. uma curta descrição das atividades a serem consideradas nas diferentes etapas do projeto, indispensáveis para alcançar os objetivos;
3. um esquema para ser usado na revisão dos resultados obtidos por meio das atividades de gestão do risco, pelos quais a informação das ameaças identificadas (natureza e significado) é disponibilizada livremente em um formato que possa ser comunicado a todos os interessados;
4. revisão das hipóteses iniciais em relação à fase operacional;
5. monitoramento, auditoria e procedimentos de revisão.

5 Critérios de aceitação do risco

Simultaneamente à definição do escopo, dos objetivos e das estratégias de gestão do risco, devem ser estabelecidos os critérios de aceitação do risco. Este procedimento faz parte integral de todo o processo de gestão do risco e servirá posteriormente à Análise Quantitativa

do Risco (AQR) como elemento de comparação e aceitação dos níveis de risco presentes no empreendimento. Nesta etapa deverão ser definidos os diferentes Riscos Aceitáveis (RA) que deverão ter concordância com os objetivos definidos previamente. Deverá ser estabelecido um RA para cada um dos riscos individuais que serão analisados na AQR. As diversas ações a serem executadas nesta etapa são:

1. definição do limite a partir do qual o risco é considerado inaceitável e, portanto, dever ser reduzido a qualquer custo;
2. definição do limite abaixo do qual não é necessário considerar uma redução do risco;
3. determinação de uma área entre dois limites onde a mitigação do risco deverá ser considerada e implementada de acordo com as circunstâncias especificas do empreendimento.

6 Análise do risco

Análise do risco é o processo que consiste em: identificar e classificar os principais riscos; calcular suas probabilidades de ocorrência e suas respectivas consequências; comparar o risco do sistema (R) com o risco admissível (RA) e estabelecer medidas de mitigação do risco, quando se fizer necessário (Figura 2).

O processo de análise do risco (AR) tem como primeira atividade a análise qualitativa dos riscos, como segunda a análise quantitativa e como terceira a definição e implementação das medidas de mitigação do risco até que se torne aceitável. Num processo de AR, a análise qualitativa é inevitável, porém a decisão em fazer a análise quantitativa é função da conjugação de diferentes elementos, tais como: a disponibilidade e qualidade dos dados, o tipo de problema, o escopo do empreendimento e até o nível de entendimento do analista, no que tange ao conceito e às ferramentas de análise de risco.

Uma metodologia é chamada de qualitativa ou quantitativa dependendo da forma em que são determinadas as componentes da Equação 1. As componentes P[A] e C podem ser calculadas usando-se ferramentas da estatística (Análise Quantitativa) ou simplesmente estabelecendo-se as probabilidades partindo do critério de um grupo de expertos (Análise Qualitativa), estabelecido a partir do nível de entendimento do problema, do nível de conhecimento do contexto geológico-geotécnico e das demais incertezas associadas.

6.1 Análise qualitativa

É recomendado, mesmo que se tenha planejado fazer a análise quantitativa, fazer a análise qualitativa na etapa de projeto, visando à identificação das ameaças potenciais e tendo em conta todos os tipos de riscos incluídos, inicialmente, na etapa de definição das Políticas do Risco. Isso tem o objetivo de identificar os principais riscos durante a construção, da maneira mais completa possível, e prover uma base estruturada para as decisões de projeto, que devem ser tomadas na etapa de projeto básico. Os resultados da análise qualitativa podem ser usados também para a definição dos pontos que devem ser analisados detalhadamente e como ponto de partida para a gestão do risco durante a etapa de licitação (ESKESEN, *et al.*, 2004).

Em resumo, a análise qualitativa do risco deve incluir:

1. a identificação e classificação de todas as possíveis ameaças;
2. definição das probabilidades de ocorrência de todas as ameaças identificadas;
3. estimação das consequências dada a ocorrência de cada uma das ameaças;
4. cálculo da matriz de risco e identificação, mediante o processo de classificação, dos riscos importantes que serão analisados, individualmente, na fase quantitativa.

Esse processo pode ser feito mediante as diferentes metodologias de trabalho grupal existentes, tais como as chuvas de ideias, as metodologias do tipo Delphi com todas suas variações (LANDETA *et al.* 2011), entre outras, manejadas isoladamente ou como uma combinação entre elas. O objetivo final é obter uma matriz que permita identificar os riscos importantes, definindo, assim, aqueles riscos que serão considerados na análise quantitativa. Um risco é importante quando a consequência é importante (desde o ponto de vista político, econômico o administrativo), quando a probabilidade de ocorrência é alta, ou quando a combinação dos dois é alta, considerando que finalmente tudo deve ser submetido ao critério do especialista, o qual, por sua vez, deve apresentar a capacidade de ver além do produto P(A)*C.

6.2 Identificação e classificação das ameaças

Segundo Eskesen *et al.* (2004), nos processos de identificação e de classificação das ameaças, deverão ser levadas em conta as causas comuns dos eventos ameaçantes, tais como:

1. a complexidade e maturidade das tecnologias aplicadas;
2. condições adversas do subsolo e da água no solo;
3. incompetência gerencial ou técnica;
4. fatores humanos e/ou erros humanos;
5. falta de comunicação e coordenação entre as partes internas e externas do empreendimento;
6. combinações de vários eventos indesejados, que individualmente não são necessariamente críticos.

Em relação aos projetos geotécnicos de obras subterrâneas, os principais tipos de risco são:

1. risco geológico, relacionado à insuficiência de informação obtida por meio das investigações planejadas;
2. risco de projeto, especialmente relacionado à dificuldade de adaptação do projeto às condições geomecânicas encontradas, construção inapropriada, experiência do projetista limitada e limitações contratuais;
3. risco de construção, relacionado à seleção de uma técnica construtiva inapropriada ou insuficientemente industrializada, ocorrência de instabilidade, experiência do construtor, e limitações contratuais;
4. risco financeiro, relacionado a limitações sociais e políticas, confusa definição de responsabilidades, litígios, e seguridade.

As ameaças mais relevantes associadas a esses riscos, tanto por sua alta probabilidade de ocorrência, como pela apresentação de consequências importantes, ou ainda por uma combinação de ambos os elementos, são:

1. Modelo geológico-geotécnico equivocado;

2. Modelo geológico-geotécnico inexato;
3. Falta de validação/atualização do modelo geológico-geotécnico durante a escavação;
4. Entendimento inapropriado do comportamento do sistema maciço-túnel;
5. Falta de incorporação da gestão do risco no empreendimento ou gestão inapropriada e/ou incompleta;
6. Avaliação equivocada das tensões naturais e das tensões e recalques induzidos pela construção do túnel;
7. Seleção equivocada do método construtivo;
8. Inadequado sistema de monitoramento e controle e/ou inadequada frequência das leituras.;
9. Sondagem insuficiente na face da escavação;
10. Variação do comportamento durante a construção do sistema maciço-túnel em comparação com o comportamento teórico;
11. Manejo inapropriado do período da curva de aprendizagem e/ou falta ou demora na implementação de correções
12. Logística e procedimentos inadequados;
13. Ocorrência de instabilidades da escavação;
14. Falta de dinheiro durante a construção;
15. Falha no fornecimento de insumos/elementos de construção na obra;
16. Ocorrência de sismos durante a construção;
17. Acidentes durante a construção alheios ao projeto (por exemplo, inundações).

Embora a lista anterior pretenda ser exaustiva, devido à complexidade das variáveis que intervêm nos projetos de engenharia civil, é importante que o grupo de especialistas defina uma lista própria que seja condizente com as características específicas do empreendimento.

Tanto as ameaças identificadas e suas probabilidades de ocorrência, como as consequências devem ser classificadas de acordo com a magnitude do risco que representam. O propósito desta classificação é prover um marco de referência para as decisões tomadas na implementação das medidas de mitigação do risco (ESKESEN *et al*., 2004) e, além disso, prover uma base para uma futura análise quantitativa individual.

O risco é obtido necessariamente do produto P(A)*C, para o qual deve ser realizada, separadamente e em primeiro lugar, a estimação de P(A) e de C. Para isso serão, inicialmente, estabelecidas classes para cada um deles, que permitam ao especialista representar com facilidade sua opinião. Posteriormente, serão também estabelecidas as classes para o produto P(A)*C, quer dizer, para o risco R. Esse processo é denominado processo de classificação do risco e deve ser realizado de acordo com um sistema de classificação concebido especificamente para satisfazer as necessidades do empreendimento. Os sistemas de classificação podem ser incluídos nos critérios de aceitação do risco.

O sistema de classificação de P(A) é denominado sistema de classificação por frequência, e o sistema de classificação de C, sistema de classificação por consequência. O sistema de classificação por frequência deve ser comum para todos os tipos de risco considerados, enquanto um sistema de classificação por consequência pode ser estabelecido, separadamente, para cada tipo de risco considerado. Preferivelmente, o sistema de classificação por consequência deve ser coordenado de tal forma, que um sistema de classificação do risco comum possa ser usado para todos os tipos de risco considerados (ESKESEN *et al*., 2004).

6.3 Classificação por frequência ou classificação da P(A)

A classificação da frequência pode ser feita identificando o número de eventos (ameaças ocorridas) em uma unidade de tempo (por exemplo, um ano) ou em uma unidade de longitude (por exemplo, quilômetro de túnel). Um exemplo disso é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Frequência de ocorrência (no período de construção) (modificado de ESKESEN *et al.*, 2004).

Classe da Frequência	Intervalo	Classe descritiva da Frequência
5	> 0,3	Muito provável
4	0,03 a 0,3	Provável
3	0,003 a 0,03	Ocasional
2	0,0003 a 0,003	Improvável
1	0,00003 a 0,0003	Muito improvável

Contrário ao que se mostra na Tabela 1, é recomendado uma separação em classes pares, pois a tradicional separação em classes ímpares, sejam cinco ou três classes ou intervalos, gera uma tendência a que o especialista selecione a classe do meio.

6.4 Classificação por consequência

A seleção dos tipos de consequências e a possível severidade (ou magnitude da consequência) irão variar de acordo com o escopo e a natureza do empreendimento. As diretrizes e as classes da classificação devem ser definidas para cada empreendimento em particular, tendo em conta as políticas específicas do risco. A seguir é apresentada a lista de prejuízos que podem ser considerados como critérios para o estabelecimento de uma classificação por consequência:

1. prejuízos dos trabalhadores ou da equipe de emergência;
2. prejuízos de terceiros;
3. danos a propriedades de terceiros;
4. dano ao meio ambiente;
5. atraso da obra;
6. perdas econômicas do dono;
7. perda da boa disposição ou boa imagem que o público em geral tem em relação ao projeto.

Com ânimo ilustrativo, mostram-se, nas Tabelas 2, 3 e 4, as classes associadas aos três primeiros prejuízos da lista anterior.

7 Determinação qualitativa e classificação do risco

O objetivo final do processo de análise qualitativa é determinar o risco associado a cada uma das ameaças identificadas na etapa preliminar da Gestão do Risco (GR). Para isso, é necessário construir a denominada matriz de risco (Figura 3). A matriz de risco representa o produto mostrado na Equação 1.

Tabela 2. Prejuízos aos trabalhadores ou à equipe de emergência.

	Desastroso	Severo	Sério	Considerável	Insignificante
No. De fatalidades/prejuízos	F > 10	1<F≤10, SI > 10	1F, SI ≤ 10	1SI, 1<MI≤10	1MI

F, fatalidade; SI, prejuízo sério e MI, prejuízo menor (siglas em inglês).

Tabela 3. Prejuízos às terceiras partes.

	Desastroso	Severo	Sério	Considerável	Insignificante
No. De fatalidades/prejuízos	F>1, SI>10	1F, 1<SI≤10	1SI, 1< MI≤ 10	1MI	-

F, fatalidade; SI, prejuízo sério e MI, prejuízo menor (siglas em inglês).

Tabela 4. Danos a propriedades de terceiros.

	Desastroso	Severo	Sério	Considerável	Insignificante
Perdas em milhões de Euros	>3	0,3-3	0,03-0,3	0,003-0,03	<0,003

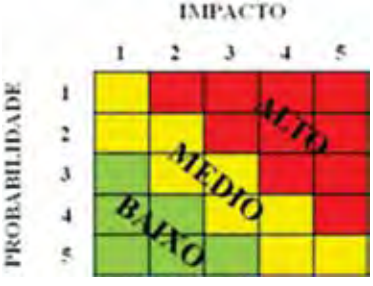


Figura 3. Matriz de risco.

Utilizando as classificações apresentadas nos parágrafos anteriores, é apresentado, na Tabela 5, um exemplo de matriz de risco. Nesse caso, seria necessária a definição clara dos significados de cada uma das classes consideradas dentro da matriz (inaceitável, indesejado, aceitável e desprezível) em relação às medidas que serão tomadas para a gestão do riscos após serem classificados.

Tabela 5. Exemplo de matriz de risco.

Frequência	Consequência				
	Desastroso	Severo	Sério	Considerável	Insignificante
Muito provável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Indesejado	Indesejado
Provável	Inaceitável	Inaceitável	Indesejado	Indesejado	Aceitável
Ocasional	Inaceitável	Indesejado	Indesejado	Aceitável	Aceitável
Improvável	Indesejado	Indesejado	Aceitável	Aceitável	Desprezível
Muito improvável	Indesejado	Aceitável	Aceitável	Desprezível	Desprezível

Como forma de exemplo, a Figura 4 e a Figura 5 mostram uma análise qualitativa feita para o empreendimento do metrô do Porto, em Portugal (GUGLIELMETTI *et al.,* 2008). Nesse exemplo, tanto a definição das classes como a estimação das variáveis P[A] e C são feitas pelos especialistas em risco, mediante entrevistas aos participantes do empreendimento por meio de sessões de chuva de ideias (*brainstorm*).

	PONTUAÇÃO	DESCRIÇÃO	DESCRIÇÃO
PROBABILIDADE	1	Improvável	Aproximadamente 1 em 1000
	2	Remoto	Aproximadamente 1 em 100
	3	Ocasional	Aproximadamente 1 em 10
	4	Provável	Mais provável de ocorrer do que não ocorrer
	5	Frequente	Espera-se que aconteça

	PONTUAÇÃO	SAUDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE Risco durante a construção	RISCO COMERCIAL Custo da implementação de medidas de segurança	SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE Risco durante a operação (assumindo um tempo de 100 anos)
IMPACTO	1	Ferimentos/inconvenientes menores. O trabalho operativo pode continuar. Danos locais de curto prazo.	Custos extras da ordem de 10k	Ferimentos/ inconvenientes menores. O trabalho operativo pode continuar. Danos locais de curto prazo.
	2	Ferimentos menores. Os operários precisam de atenção de pronto socorro. O trabalho para. Danos locais/regionais de mediano prazo.	Custos extras da ordem de 100k	Ferimentos menores. Os operários precisam de atenção de pronto socorro. O trabalho para. Danos locais/regionais de mediano prazo.
	3	Ferimentos ou doença que geram reporte de incapacidade temporal. Danos regionais/locais de longo prazo.	O projeto sofre atraso por algumas semanas. Custo para o projeto ?1Ms	Ferimentos o doença que geram reporte de incapacidade temporal. Danos regionais/locais de longo prazo.
	4	Ferimentos ou doenças maiores com efeitos de longo prazo. Danos generalizados de longo prazo.	O projeto sofre atraso por alguns meses semanas. Custo para o projeto ?10Ms	Efeitos importantes para a cidade. Fechamento da via por 24 horas no mínimo.
	5	Fatalidades (mortes). Danos permanentes generalizados.	Fechamento potencial do projeto (abdicação).	Fatalidades (mortes). Danos permanentes generalizados.

Figura 4. Exemplos de escalas qualitativas da probabilidade e impacto de um evento.

No exemplo, foram usados três critérios para a avaliação da consequência: (1) saúde, seguridade e impacto ambiental durante a construção; (2) impacto (ou consequência) comercial (sobrecustos devido a medidas de seguridade adicionais), e (3) saúde, seguridade e impacto ambiental durante a execução do plano de fogo. Aqui é usado o conceito de Impacto (I), que é desnecessário na medida em que, em termos gerais, esse conceito é uma agregação de todas as possíveis consequências associadas à ocorrência de uma ameaça. Definindo P[A] e I, o risco, R, foi definido como seu produto. Não entanto, os riscos os riscos na construção, comerciais e operacionais, são estimados separadamente (Figura 4). Para esse exemplo, foram considerados separadamente os riscos na construção, comerciais e operacionais. A escala de valores resultante para a matriz de risco, que adotou valores que vão de 1 a 25, está associada com um nível de risco estimado (de irrelevante a inaceitável, como mostrado na Figura 4) e, mais importante, com os critérios de aceitabilidade específicos do projeto ("baixo" = aceito, "médio" = para ser mais profundamente analisado, "alto" = para ser mitigado). Riscos podem ser priorizados, destacando aqueles que precisam ser mitigados e aqueles que podem ser aceitos.

ESCALA	NIVEL DE RISCO	AÇÕES REQUERIDAS
17-25	Inaceitável	A construção não poderá iniciar antes de o risco ser reduzido. Mesmo assim, se puder ser mitigado, consultar o gerente geral.
13-16	Substancial	A construção não pode ser iniciada antes de o risco ser reduzido. A solução para o risco existe mas requer de investimentos adicionais.
9-12	Significante	A construção pode iniciar e continuar até o momento em que apareça a necessidade de implantar as medidas de mitigação.
5-8	Menor	Os trabalhos geralmente sofrem atrasos. Necessário considerar soluções para otimização dos custos.
1-4	Irrelevante	Desalinho.

RISCO	PONTOAÇÃO	RISCO DA SAUDE E SEGURANCA	RISCO	
			COMERCIAL	OPERACIONAL
	Baixo	Verificar se outros riscos podem ser eliminados com modificações no projeto. Proceder segundo o projeto	Buscar alternativas e avaliar custo/benefício das medidas de mitigação em relação à severidade do risco.	
	Médio	Considera projeto e os métodos de construção alternativos. Se as alternativas não são viáveis, especificar as precauções a serem consideradas. Listar os perigos residuais no registro do risco.	Distribuir a informação da avaliação do risco entre os gerentes do projeto, partes interessadas e terceiros relevantes.	
	Alto	Buscar soluções alternativas. Se as alternativas não são viáveis, especificar as precauções a serem adotadas, e dar sugestões ao gerente chefe e ao supervisor do planejamento (quando aplicável). Listar os perigos residuais no registro do risco.	Listar os perigos residuais no registro do risco.	

Figura 5. Exemplo da escala qualitativa do risco associado com um evento

Finalmente, obtém-se a respectiva matriz de risco mostrada na Figura 6, em que os riscos em vermelho são classificados como altos, em amarelo como médios e em verde como baixos, tudo em função dos critérios de aceitação estabelecidos previamente.

PROBABILIDADE						
	5	0 - 15	20 - 30	35 - 45	50 - 60	65 - 75
	4	0 - 12	16 - 24	28 - 36	40 - 48	52 - 60
	3	0 - 9	12 - 18	21 - 27	30 - 36	39 - 45
	2	0 - 6	8 - 12	14 - 18	20 - 24	26 - 30
	1	0 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	13 - 15
		0 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	13 - 15
		IMPACTO				

Figura 6. Matriz de risco e critérios de aceitação.

8 Análise quantitativa

Para cada um dos riscos mais importantes identificados na etapa de análise qualitativa, deve ser feita uma análise quantitativa. A análise quantitativa individual, denominada por Eskesen *et al.* (2004) como análise específica do risco, consiste em acurar, mediante aproximação estatística, a análise feita na fase de análise qualitativa.

A estatística permite a designação de distribuições probabilísticas a vários eventos, sejam discretos (por exemplo, mediante distribuição de Poisson) ou contínuos (por exemplo, mediante distribuições Gaussianas, logarítmicas ou exponenciais) (CHIRIOTTI *et al.,* 2003). Tais distribuições probabilísticas são a base para a avaliação da probabilidade do sistema se comportar de maneira confiável ou não.

Guglielmetti *et al.* (2008) descrevem que, no campo dos túneis urbanos mecanizados, o conceito de probabilidade pode ser aplicado à maioria das variáveis de entrada do projeto, tais como os parâmetros geotécnicos, a sequência espacial do estado do parâmetro (por exemplo, variação espacial da litologia), a duração do ciclo de construção e os eventos discretos, tais como o aumento de uma situação adversa (por exemplo, desconhecimento das características do solo, instabilidade da frente de escavação, acidentes, etc.).

Portanto, os dados relacionados com as características do subsolo, as variáveis de construção e os eventos imprevisíveis podem ser tratados estatisticamente para identificar a mais apropriada função de distribuição para cada variável. Por exemplo, a resistência à compressão simples e o módulo de deformação podem ser representados mediante uma distribuição Gaussiana, o espaçamento das descontinuidades mediante uma distribuição exponencial negativa (CHIRIOTTI *et al*., 2003), e uma simples distribuição triangular pode ser usada para representar a duração ou o custo de um ciclo construtivo simples feito em condições predefinidas (GUGLIELMETTI *et al*., 2008).

O processo de análise quantitativo pode compreender uma ou várias das seguintes metodologias (ESKESEN *et al.,* 2004):

1. uma árvore de falhas das causas das ameaças;
2. uma árvore de eventos das consequências;
3. uma quantificação completa do risco, com o propósito de avaliar, por exemplo, a relação custo-benefício de implementação das medidas de mitigação, ou com o propósito de prover bases quantitativas para a seleção entre linhas alternativas de ação.

Uma quantificação completa do risco pode simplesmente ser feita para cada ameaça mediante a designação de um número F para a frequência (ou probabilidade de ocorrência P(A)) e um número C para a consequência. O risco para essa ameaça é, então, estimado mediante o produto de P(A) e C, equivalentemente como na análise qualitativa, e o risco total do empreendimento pode ser estimado mediante a agregação de todas as ameaças. Esse tipo de abordagem tem a desvantagem de não conseguir descrever as incertezas envolvidas na estimação do risco (ESKESEN *et al*., 2004).

Pode-se obter uma descrição das incertezas mediante a consideração de cada consequência como uma variável estocástica e a designação de uma distribuição para cada variável em lugar de um único valor. A distribuição pode ser obtida mediante a designação do valor mais provável, o mínimo e o máximo. A partir do valor mais provável, o mínimo e o máximo, pode ser atribuído a uma distribuição triangular ou a outra de qualquer tipo. O risco total pode ser obtido, por exemplo, mediante uma simulação de Monte Carlo, considerando a correlação entre as variáveis.

Referências bibliográficas

EINSTEIN, H. H. (1996). Risk and risk analysis in rock engineering. Tunnelling and Underground Space Technology, p. 141-155.

ESKESEN, S. D.; TENGBORG, P.; KAMPMANN, J.; VEICHERTS, T. H. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group n. 2. Tunnelling and Underground Space Technology, p. 217-237.

CHIRIOTTI, E., GRASSO, P., XU, S. (2003). Annalyses of tunnelling risk: state-of-the-art and examples. Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 69. p. 35-44.

GUGLIELMETTI, V.; GRASSO, P.; MAHTAB, A. ; XU, S. (2008). Mechanized tunnelling in urban areas. Turin, Italia: Taylor & Francis.

LANDETA, J., BARRUTIA, J., LERTXUNDI, A. (2011). Hybrid Delphi: a methodology to facilitate contribution from experts in professional contexts technol. Forecast. Soc. Change (2011), doi:10.1016/j.techfore.2011.03.009.

MENG, Q.; QU, X.; WANG, X. YUANITA, V.; WONG, S. C. (2010). Quantitative risk assessment modeling for nonhomogeneous urban road tunnels. Risk Analysis, n. doi: 10.1111/j.1539-6924.2010.01503.x ed.

SHAHRIAR, K.; SHARIFZADEH, M; HAMIDI, J. K. (2008). Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. Tunnelling and Underground Space Technology, p.318-325.

SOUSA, R. L. (2010). Risk analysis for tunneling projects. Tese doctoral. Massachusetts Institute of Technology (MIT).

STURK, R.; OLSSON, L.; JOHANSSON, J. (1996). Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, p. 157-164.

U. S. NuCLEAR REGULATORY COMMISSION. (1975). Reactor safety study, an assessment of accident risks in U.S. nuclear power plants. Washington, DC.

Capítulo 23
Risco em obras devido à infiltração

Maurício Martines Sales
Luis Edmundo Prado de Campos
Silvio Romero de Melo Ferreira
Jamily Quental Cruz
Carlos Alberto Lauro Vargas

1 Introdução

O comportamento do solo é influenciado pela presença de água em seus vazios. Esse sistema multifásico tem sido objeto de estudo na Geotecnia. Diversas propriedades dos solos são alteradas com a variação da umidade presente no solo. Resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade são exemplos de alguns comportamentos do solo que sofrem a influência da maior ou menor presença de água entre as partículas sólidas do solo, ou seja, são propriedades que variam ao longo das estações climáticas da superfície terrestre.

No estudo de infiltração como um processo natural do ciclo hidrológico ou como uma ação forçada buscando recompor a situação de pré-ocupação humana, não se pode esquecer que o volume de água que adentra a massa de solo alterará o seu comportamento.

O projeto de obras de infiltração forçada deve tentar prever as alterações nos solos vizinhos, para que um benefício imaginado não venha a causar malefícios inesperados.

2 Infiltração próxima a fundações

Para ter um bom comportamento, a fundação deve atender aos critérios de capacidade de carga e deformações compatíveis (recalques aceitáveis). Ambos os critérios sofrem alterações com o estado do solo.

Em termos de capacidade de carga, a maior umidade advindo da infiltração reduz a coesão do solo, eleva o grau de saturação nas imediações da entrada d'água e, consequentemente, reduz a sucção atuante. O estudo da variação da capacidade de carga vem sendo feito de várias formas. Nos métodos teóricos, como o de Terzaghi (1943), os parâmetros do solo a serem empregados devem prever a pior hipótese de umidade em seu dimensionamento e, na fórmula original, os valores de coesão (c) e peso específico (γ) devem refletir as situações que ocorrerão.

Nos métodos práticos de determinação da capacidade de carga, via provas de carga, a influência da infiltração foi estudada em diversos trabalhos por todo o Brasil. A motivação inicial era, principalmente, avaliar a possibilidade de colapso do solo com a entrada de um grande volume de água. Trabalhos como de Carvalho e Souza (1990), Lobo *et al.* (1991), Fer-

nandes (1995), Camapum de Carvalho *et al.* (1995), Cintra *et al.* (1997), Sales (2000), dentre outros, compararam a capacidade de carga de sapatas e estacas ensaiadas com e sem o efeito da infiltração nas proximidades da fundação. A Tabela 1 resume alguns resultados relacionando a perda de capacidade de carga de fundações em função de inundações forçadas próximas às provas de carga.

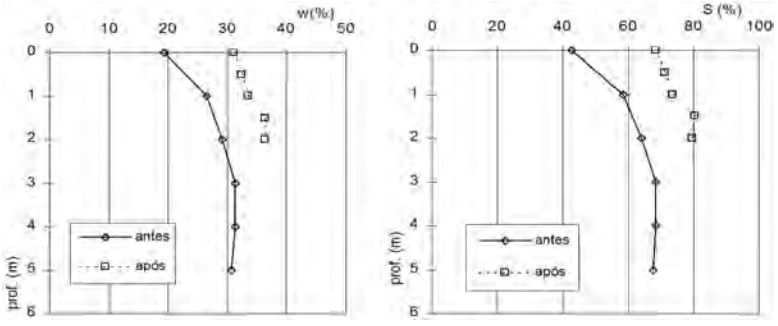
Tabela 1. Influência da inundação dos solos em resultados de provas de carga com carregamento vertical (SALES, 2000).

Autor	Tipo de Fundação	Processo de Inundação	Tempo de Inundação	Redução na Capacidade de Carga
Agnelli (1992)	placa a 1 e 2m²	1º	4 – 9 h	32 – 46 %
Souza (1993)	placa a 0,7m²	1º	não citado	40 %
Carvalho e Souza (1990)	estaca escavada L=6m, D=0,25m	1º	10 h	67 %
Silva (1990)	estaca broca L=6m, D=0,25m	2º	24 h	77 %
Silva (1990)	estaca broca L=6m, D=0,25m	1º	15 h	71 %
Lobo *et al.* (1991)	estaca escavada L=2-6m, D=0,25	2º	48 h	35 - 43 %
Lobo *et al.* (1991)	estaca apiloada L=2-6m, D=0,25	2º	48 h	23 - 35 %
Fernandes (1995)	estaca broca L=6m, D=0,25m	1º	> 48 h	32 %
Fernandes (1995)	grupo 2 estacas L=6m, D=0,25m	1º	> 48 h	42 %
Fernandes (1995)	grupo 3 estacas L=6m, D=0,25m	1º	> 48 h	26-30%
Fernandes (1995)	grupo 4 estacas L=6m, D=0,25m	1º	> 48 h	25 %

Observação: Tipo de Inundação: (1º) = inundações em cavas superficiais circundantes às fundações; (2º) = inundações com cavas + furos verticais próximos às fundações;

Sales (2000) realizou ensaios na cidade de Brasília, com sapatas isoladas, estacas isoladas e sapata sobre uma estaca (fundação mista), com e sem a inundação forçada do solo sob a fundação. Os ensaios foram realizados no Campo Experimental da Geotecnia/UnB, situado no Campus Darcy Ribeiro, em frente ao Bloco SG12. O perfil de solo apresentava uma camada superior de 8 m de argila arenosa vermelha, bastante laterizada. A Figura 1 apresenta a variação de umidade e grau de saturação, nos primeiros 2 m, provocada pela inundação da cava superficial circundante à fundação.

Índices de vazios elevados e facilidade na drenagem são características recorrentes nos solos tropicais laterizados. Assim, o processo de infiltração forçada e também as chuvas intensas não provocam a saturação do solo, mas apenas uma elevação do grau de saturação, como mostrado na Figura 1.



(a) umidade (b) grau de saturação

Figura 1. Alteração do perfil de umidade e grau de saturação com o processo de inundação.

As Figuras 2 a 4 ilustram as curvas carga-recalque tanto na situação de umidade natural do solo, quanto após 48 h de inundação das provas de carga realizadas.

Observa-se que a sapata e a estaca perderam de 40% a 50% da capacidade de carga em função da inundação. A faixa de redução de capacidade de carga está dentro da faixa encontrada por outros autores (Tabela 1). A deformabilidade do solo não variou tanto com a inundação como a capacidade de carga, ou seja, para pequenas cargas o efeito de uma inundação poderia não ser notado em termos de deformação, mas para cargas de projeto usuais em fundações (FS ≈ 2) o acréscimo de recalques já poderia ocorrer.

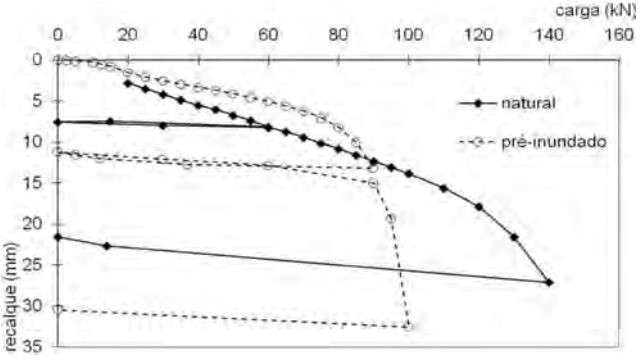


Figura 2. Comparação das provas de carga de uma sapata isolada, com e sem inundação.

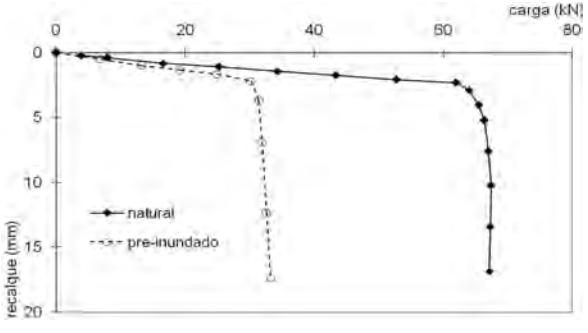


Figura 3. Comparação das provas de carga de uma estaca isolada, com e sem inundação.

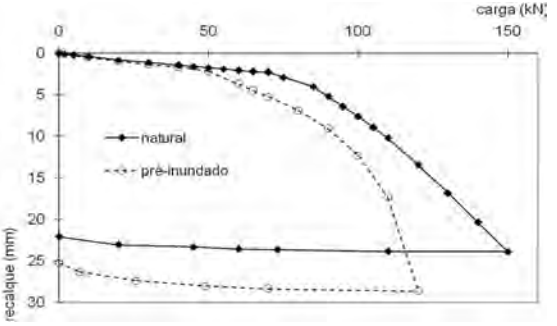


Figura 4. Comparação das provas de carga de uma sapata sobre uma estaca, com e sem inundação.

3 Infiltração em aterros

Os aterros são projetados para serem compactados na umidade ótima para que tenham maior estabilidade quando vierem a sofrer alterações naturais do teor de umidade. Quando ocorrem infiltrações concentradas, provocadas por obras construídas sobre ou próximas aos aterros, estes podem sofrer grandes recalques ou rupturas. De uma forma geral, deve-se evitar a construção de estruturas de infiltração, como poços, valas ou bacias, inseridas ou sobre aterros.

Infiltrações posteriores à construção de obras sobre aterros podem aumentar o recalque (redução do índice de vazios). Essas infiltrações podem advir de estruturas de infiltração ou da própria chuva, sendo que os danos serão próximos à região do terreno cujo teor de umidade será elevado.

A água de chuva pode atingir diretamente o aterro e nele infiltrar ou se acumular no pé do talude e, a seguir, infiltrar gradativamente. A execução dos aterros, em ambiente urbano ou em obras lineares, como as estradas, altera a topografia e a cobertura vegetal local e, consequentemente, o fluxo natural das águas pluviais que, ao infiltrarem nos aterros de forma não esperada, podem resultar em sérios danos. Fatores como altura elevada do aterro ou baixo grau de compactação podem ampliar os danos provenientes da infiltração.

A Figura 5 ilustra um caso de uma obra que, após cinco anos de construção, experimentou a estação chuvosa 2011/2012 com precipitações bem superiores às anteriores, resultando

Figura 5. Injeção de calda de cimento em aterro que adensou por excesso de infiltração de águas de chuvas.

em vários danos nos pisos e nas alvenarias. A alternativa de reparo escolhida foi a injeção de calda de cimento via vários furos inclinados, com o objetivo de reduzir a compressibilidade do aterro. O procedimento também reduziu o recalque das estacas inseridas no aterro e aumentou a capacidade de carga das estacas.

4 Infiltração próxima a taludes naturais

Além dos aterros, os taludes naturais também sofrem com o processo de infiltração. A alteração da sucção do solo nas encostas e ainda o aumento do peso específico do solo inundado podem reduzir bastante o "Fator de Segurança" do talude e, eventualmente, resultar em ruptura.

Dentro do tema de infiltração em solos, outro fenômeno físico a ser ponderado nas obras com estruturas de infiltração posicionadas muito próximas aos taludes é a criação de elevados gradientes de percolação e consequente carreamento de partículas. Isso gera um processo de erosão interna no talude, que pode evoluir para a ruptura do talude. A ilustração apresentada na Figura 6 sintetiza o problema.

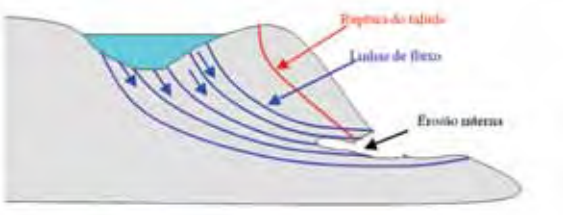


Figura 6. Erosão interna provocada por infiltração em bacia de acumulação de água próxima a talude.

Diversas regiões brasileiras convivem com problemas de instabilidade de encostas. Durante as estações chuvosas, devido à maior infiltração e suas consequências, vários acidentes ocorrem sistematicamente. Para exemplificar o problema, elegeu-se, neste capítulo, a cidade de Salvador para descrever seus problemas particulares com infiltração em taludes.

A escolha do local para implantação da primeira capital do Brasil foi motivada pela existência de um ponto alto, servindo de observação, e de uma baía com águas calmas, servindo como porto para as embarcações. Essa topografia é resultado de uma grande movimentação tectônica (falha de Salvador), em que um bloco subiu, formando a parte alta, e o outro desceu, formando a Baía de Todos os Santos. Esse movimento ocasionou um elevado grau de fraturamento da rocha matriz, o que, aliado ao clima quente e úmido, propiciou a formação de uma grande espessura de solo residual. Assim, é comum encontrar o topo rochoso em profundidade superior a 15 metros; devido ao maciço muito fraturado, o nível de água, quando encontrado, coincide com o topo. A geologia do sitio é formada por grande parte do embasamento cristalino, onde predomina o granulito, coberto em alguns pontos pela formação barreiras, tendo a leste o depósito quaternário, predominando areias, e a oeste a formação ilhas, onde predomina os folhelhos, cuja decomposição gera o massapê, solo expansivo (Figura 7).

Os escorregamentos ocorridos no sítio urbano são geralmente superficiais, ocorrendo predominantemente no período chuvoso, nos meses de abril a junho.

Além disso, observa-se que os escorregamentos não ocorrem no início da estação chuvosa nem em chuvas de certa intensidade ocorridas em períodos isolados. Diante da dificuldade de infiltração, ocorrem problemas de alagamentos. No período chuvoso, quando chove por um longo período, após a primeira semana de chuvas constantes é que começam a ocorrer os primeiros deslizamentos de terra. Assim, a maioria dos deslizamentos que ocorrem em Salvador está associada ao umedecimento do solo, com a redução de resistência ao cisalhamento, diante da perda de sucção.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento, realizados em Salvador, foi obtido, na umidade natural, coesão média de 60 kPa; quando inundado, a coesão média é de 18 kPa, comprovando a grande perda de resistência com o umedecimento.

Figura 7. Mapa geológico de Salvador.

Visando analisar esse mecanismo, Dias (2006) realizou um estudo da variação do fator de segurança com a frente de umedecimento, considerando simplificadamente apenas dois solos: um solo na parte superior da frente de umedecimento com propriedades de ensaios em amostras inundadas, e outro na parte inferior com propriedades de ensaios em amostras na umidade natural. Foi utilizado um sistema de informações geográficas, em que se tinham informações da topografia. Com a equação (1), foi determinado o fator de segurança para diversas profundidades da frente de umedecimento, sendo "h" a profundidade alcançada pela frente de umedecimento e "β ", a inclinação do terreno.

$$FS = \frac{c}{\gamma * h * sen\beta . \cos\beta} + \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \qquad (1)$$

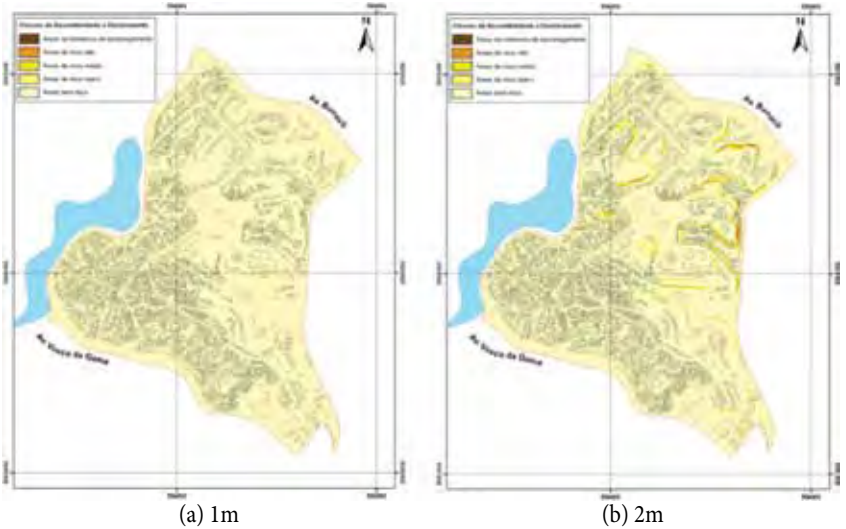
A Figura 8 ilustra o posicionamento da área estudada dentro do Município de Salvador. Os resultados da variação do fator de segurança em função do avanço da frente de umedecimento são apresentados na Figura 9. As cores empregadas na legenda variam do bege (claro) ao marrom (escuro), indicando o crescimento da susceptibilidade de escorregamentos. Antes desses estudos, era comum em Salvador a adoção de parâmetros de resistência de solos inundados/saturados nos projetos de estabilização, o que levava à adoção de soluções de contenções, com predomínio de cortinas atirantadas. Isso ocorria porque se considerava que o mecanismo estava relacionado com a elevação do nível de água. Após os estudos, começaram-se a avaliar soluções de drenagem e proteção superficial, visando evitar o umedecimento do terreno e reduzir consideravelmente os custos para estabilização.

Figura 8. Localização da área estudada.

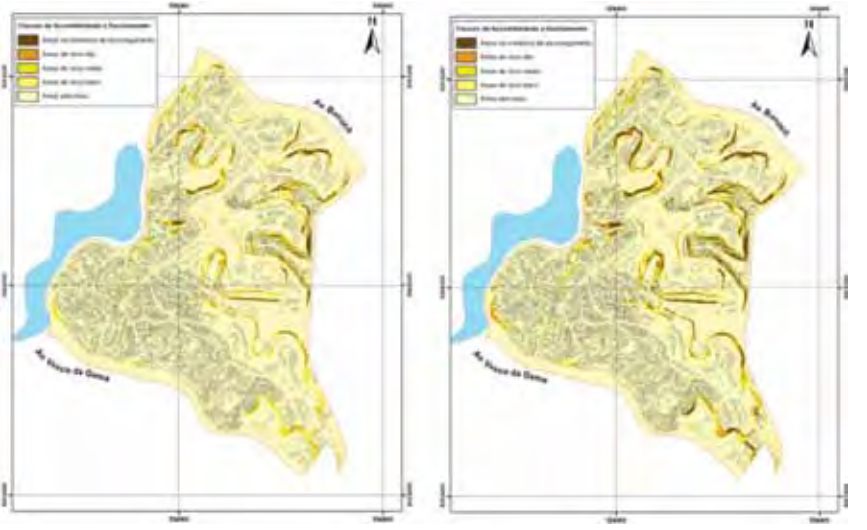
Com esse mecanismo de instabilidade de talude, em que ocorre a ruptura em função da infiltração e, consequentemente, perda de resistência com a redução da sucção, muitos conceitos devem ser revistos, como, por exemplo:

- redução da largura do patamar em taludes altos, já que o patamar é o ponto de maior infiltração de água;
- taludes mais suaves podem reduzir o fator de segurança, uma vez que podem propiciar maior infiltração.

O estado atual do estudo de estabilidade de talude em Salvador está na determinação da variação da condutividade hidráulica e sucção em função do teor de umidade. Pode-se, assim, usar um programa de estabilidade de talude acoplado com um programa de infiltração, permitindo estimar-se a variação do fator de segurança com o tempo.



(a) 1m (b) 2m



(c) 3m (d) 4m

Figura 9. Classes de Susceptibilidades ao Escorregamento quando a frente de umedecimento alcança diferentes profundidades: (a) 1m; (b) 2m; (c) 3m; (d) 4m.

5 Infiltração próxima a obras rasas

O presente item é ilustrado com a apresentação de um caso de obra em Pernambuco onde foram executadas fundações rasas e o processo executivo implicou no aumento de infiltração superficial.

A implantação de um projeto executivo de linha de transmissão busca gerar o mínimo de mudanças no meio ambiente; porém, alguns processos são difíceis de serem mitigados. A remoção da vegetação local para a construção das fundações das torres de transmissão e a presença da água das chuvas que escoa e infiltra pelo solo podem provocar carreamento de partículas do solo e desencadear um processo de erosão (Figura 10). Essa situação foi identificada em fundações das torres da Linha de Transmissão Recife II / Bongi / Joairam, localizadas no Município de Jaboatão dos Guararapes, no distrito do Curado, durante a implantação de estruturas do circuito simples (CRUZ *et al*., 2009) .

O estudo de caso tem por finalidade identificar e caracterizar a dispersividade do solo a qual causando erosão pela percolação da água no entorno da fundação da torre da linha de transmissão com dimensões 2,80 m x 2,80 m x 2,50 m. A estrutura está apoiada em solo da Formação Barreira, caracterizado pela presença de areias e argilas. O solo é constituído pelas frações de pedregulho (1% a 3%), areia (64% a 77%), silte (12% a 31%) e argila (5% a 41%). No período da coleta das amostras, os valores da umidade encontravam-se inferiores ao limite de plasticidade, estando o solo no estado semi-sólido. Os valores de IP e WL situam-se acima da Linha-A e à esquerda da Linha-B na Carta de Plasticidade de Casagrande. A fração argila é inativa até 2,50 m de profundidade e ativa de 2,50 a 6,50 m e, segundo Skempton (1953), predominantemente de baixa atividade, pelo critério de Van der Merwe (1964),

Figura 10. Degradação do solo, erosão no entorno da base da fundação.

O solo é ácido (pH < 7). A saturação por bases é baixa até a profundidade de 4,10 m; a partir dessa profundidade até 6,50 m, passa a ser alta. Quanto à retenção por cátions, à saturação por alumínio e ao grau de saturação por bases, verifica-se que de 0,0 a 4,50 m o solo é acríco, passando a eutrófico de 4,50 a 6,50 m. A condutividade elétrica é alta e superior a 27 µS. Com base na capacidade de troca catiônica, a argila é de baixa atividade, confirmando os critérios de Skempton (1953) e de Van der Merwe (1964).

A dispersividade da fração argila foi analisada pelos seguintes métodos: Comparativo de granulometria e Análise química. Os resultados são apresentados na Tabela 2. No ensaio Comparativo de granulometria, há uma redução da fração de argila do solo quando não se usa defloculante, indicando que o solo encontra-se naturalmente com sua estrutura floculada. A porcentagem de dispersão do solo entre as profundidades de 0,60 a 1,00 m, 3,00 a 4,10 m e 6,30 e 6,50 m ficou compreendida entre 20% e 50%, indicando que o solo é moderadamente dispersivo, correspondendo a 33% dos resultados; nas demais profundidades, o solo é não dispersivo. A partir dos resultados dos ensaios químicos, obteve-se a relação entre o total de sais no extrato de saturação e a porcentagem total de sódio. Nota-se que a maioria dos resultados (80%) encontrava-se na Zona 1, indicando tratar-se de argilas altamente dispersivas, e 20% dos resultados encontram-se nas Zonas 3 e 4 de argilas pouco dispersivas e não dispersivas (Figura 11), considerando o critério de classificação de Sherard (1972).

As argilas dispersivas possuem preponderância de cátions de sódio dissolvidos na água intersticial, enquanto as argilas resistentes à dispersão possuem comumente cátions de cálcio e magnésio. As argilas dispersivas erodem facilmente na presença de água, quando a força repulsiva (superfície elétrica), atuante entre as partículas de argila, excede a força de atração (Van der Walls). Assim, essas partículas são progressivamente separadas da massa, ficando em uma suspensão coloidal. Quanto menor o teor de sódio e maior a quantidade de sais existentes na água livre do solo, menor será a susceptibilidade à dispersão da amostra de solo considerada (SHERARD, 1972). Por outro lado, se a quantidade de sais dissolvidos na água livre do solo for alta, poderá predominar a ação dos cátions cálcio, magnésio e potássio que tendem a flocular as partículas de argila. Assim, a determinação dos sais dissolvidos na água livre é importante na análise da dispersividade.

Dos dois métodos de identificação de argilas dispersivas utilizados, que toma por base os resultados dos ensaios comparativos de granulometria e químico, o que melhor identificou a suscetibilidade da argila de dispersar em água foi o que se baseia nos resultados do proposto por Sherard (1972), que permite quantificar o total de sais dissolvidos na solução e a porcentagem de sódio na solução.

Tabela 2. Resultados dos ensaios: Comparativo de Granulometria e Análise Química.

Profundidade (m)	Comparativo de Granulometria			Análise Química – Sherard (1972)		
	% < 0,005mm		% de dispersão	Total de sais meq / L de extrato	Na^+ meq / L de extrato	% de Na^+
	com defloc.	sem defloc.				
0,0 a 0,4	29	0	0	1,63	0,4	24,54
0,4 a 0,6	41	2	5	0,95	0,59	62,11
0,6 a 1,0	7	2	29	0,32	0,14	43,75
1,0 a 2,1	27	3	11	0,87	0,57	65,52
2,1 a 2,5	29	0	0	0,52	0,28	53,85
2,5 a 2,9	23	0	0	1,44	0,85	59,03
2,9 a 3,0	20	2	10	0,88	0,42	47,73
3,0 a 3,2	17	8	47	0,73	0,45	61,64
3,2 a 4,0	12	5	42	0,65	0,37	56,92
4,0 a 4,1	7	2	29	0,43	0,2	46,51
4,1 a 4,5	7	0	0	0,69	0,43	62,32
4,5 a 5,3	5	0	0	1,04	0,78	75,00
5,3 a 5,5	6	0	0	1,16	0,89	76,72
5,5 a 6,3	6	0	0	1,98	1,14	57,58
6,3 a 6,5	8	2	25	2,28	1,26	55,26

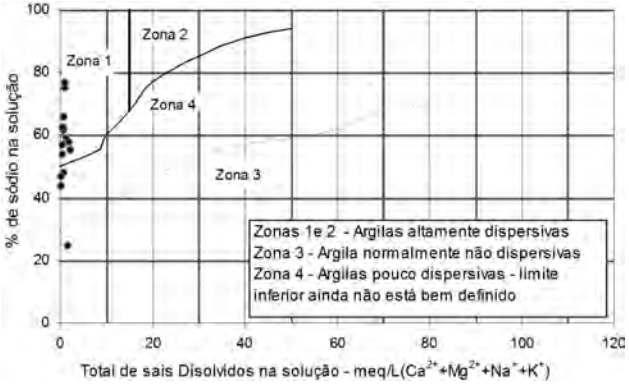


Figura 11. Relação entre o total de sais dissolvidos na solução e a porcentagem de sódio na solução (SHERARD, 1972.)

Nas observações de campo, durante a construção da fundação da torre da linha de transmissão, houve aparecimento de erosões nas proximidades da estrutura, após períodos chuvosos, devido à percolação e infiltração das águas, como já mostrado na Figura 10. Em campo, o processo de degradação do solo ficou identificado. Como o processo encontrava-se no início, medidas corretivas foram tomadas, como o plantio de gramíneas e a construção de canaletas para facilitar o escoamento das águas superficiais, reduzindo o efeito do impacto das chuvas no solo e criando resistência à erosão pela cobertura vegetal, como apresentado na Figura 12.

Figura 12. Cobertura vegetal de gramíneas, recuperação da área degradada.

Referências bibliográficas

AGNELLI, N. (1992). Estudo da colapsividade do solo de Bauru Através de Prova de Carga Direta. São Paulo: USP. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MELO, A.C.; SANTOS NETO, P. M.; SILVA, C. M. (1995). Considerações sobre provas de carga em estacas em solos colapsíveis com inundação. *In*: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO-SATURADOS, Porto Alegre. Anais. p. 159-173.

CARVALHO, D.; SOUZA, A. (1990). Análise do efeito de umedecimento do solo de fundações rasas e profundas em solos porosos. *In*: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES (IX COBRAMSEF), Salvador. Anais... v. 2, ABMS E ABGE. p. 109-114.

CINTRA, J. C. A.; ALBIERO, J. H.; VILAR, O. M. (1997). Pile load tests in collapsible soils: conclusions and recommendations. Proceedings of the 14th INTERN. CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Hambourg 6-12 sept. 1997 p. 781-782.

CRUZ, J. Q.; PAIVA, S. C.; FERREIRA, S. R. M. (2009). Erosão do solo: estudo de caso em linha de transmissão de energia elétrica. *In*: Arminda Messias Saconi e Marcos Roberto Nunes Costa. (Org.). *Gestão integrada de ambientes costeiros e impactos ambientais*. 1 ed. Recife: Fasa, v. 1, p. 263-272.

DIAS, L. S. O. (2006). Identificação de áreas suscetíveis a deslizamento de terra utilizando sistema de informações geográficas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia - UFBA, Salvador

FERNADES, J. C. S. (1995). Grupos de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solo colapsível. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LOBO, A. S.; ALBIERO, J. H.; FERREIRA, C. V. (1991). Influência da inundação do solo na carga última de estacas de pequeno porte. II SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA (II SEFE) São Paulo. p. 207-216.

SALES, M. M. (2000). Análise do comportamento de sapatas estaqueadas. Brasília: UnB. 229 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

SILVA, J. C. B. (1990). Análise dos resultados de prova de carga em estacas de pequeno diâmetro. *In:* IX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES (IX COBRAMSEF), Salvador. Anais... v. 2, Salvador, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotecnica (ABMS) . p. 125-131.

SHERARD, J. L. (1972). Study of piping failures and erosions damage from rain in clay dams in Oklahoma and Mississipi. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D. C. March.

SKEMPTON, A. W. (1953). Soil-mechanics in relation to geology. Proc. Yorkshire Geol. Soc, 29.

SOUZA, A. (1993). Utilização de fundações rasas no solo colapsível de Ilha Solteira (SP). São Paulo: USP.126 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnai), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de Sào Paulo, São Paulo.

TERZAGHI, K. (1943). Theoretical soil mechanics. New York: Jonh Wiley and Sons.

VAN DER MERVE, D. H. (1964). The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils Trans. South Africa. Institute of Civil. Engineering. v. 6, n. 6.

Capítulo 24
Infiltração e estabilidade de encostas em condições não saturadas

Marcos Massao Futai
Denielle Fernanda Morais de Melo
Carlos Rezende Cardoso Júnior
Veroska Dueñas Zambrana

1 Introdução

A principal causa dos escorregamentos no Brasil é a água, que pode atuar como agente preparatório e deflagrador dos escorregamentos. Os escorregamentos podem ocorrer em solos não saturados ou saturados. Em ambas as condições, a água comanda o processo de instabilização. A redução da sucção, a saturação do solo ou a elevação do nível freático dependem da interação do solo com as condições climáticas. Em condições normais, a infiltração da água da chuva é a principal fonte de água das encostas. Em encostas ocupadas, pode haver lançamento de águas servidas e, em outros casos, vazamentos de tubulações de água ou esgoto, os quais também podem contribuir para infiltração. Neste capítulo, é dado enfoque para a infiltração como agente preparatório, deflagrador ou acelerador de deslizamentos.

Os escorregamentos, responsáveis por desastres que causam vítimas e perdas econômicas, são muito comuns em países como o Brasil. O clima tropical contribui para formação de solos espessos, além de apresentar elevados índices pluviométricos.

Os mecanismos de escorregamento em taludes ou encostas não saturados são complexos, porque não se pode adotar uma condição estacionária de fluxo para realizar uma análise realista. Os conceitos básicos da mecânica dos solos não saturados já estão consolidados. O meio técnico sabe como considerar o efeito da sucção na resistência do solo e também nas características hidráulicas do solo. Da mesma forma, há equipamentos com sucção controlada (ou medida de sucção) para obtenção dos parâmetros dos solos não saturados. Também houve um grande desenvolvimento de modelos teóricos e sua implementação em programas computacionais. Atualmente, dispõe-se de vários programas comerciais que incorporam esses conceitos.

Apesar da disponibilidade de ferramentas para se projetar usando os conceitos de solos não saturados, isso ainda não é prática comum em quase todo mundo. Neste capítulo, não se pretende estabelecerem metodologias de projetos de estabilidade usando conceitos de infiltração em solos não saturados, mas, sim, sintetizar alguns aprendizados que podem ser reunidos a partir de alguns casos reais.

2 Mecanismos de instabilização

Dentre os vários sistemas de classificação de movimentos de massa, Wolle (1988) particularizou os mecanismos que ocorrem na Serra do Mar, os quais podem ser generalizados para maioria das encostas brasileiras. Wolle (1988) dividiu os fenômenos de instabilização em: escorregamentos em solo (translacionais, rotacionais ou provocados por desconfinamento), escorregamentos em rocha (quedas, rolamentos de matacões, deslizamentos de blocos, escorregamentos estruturados) e escoamentos lentos.

Wolle (1988) apresentou, de forma geral, dois tipos de mecanismos possíveis de instabilização, associados aos escorregamentos translacionais da Serra do Mar: mecanismo clássico e mecanismo alternativo.

No ***Mecanismo Clássico***, que consiste na elevação do nível de água pré-existente, devido ao fluxo da água infiltrada, a ruptura no talude é determinada por uma elevação quase instantânea do nível freático, passível de ocorrência quando a frente de umedecimento atinge o lençol freático. Esse fato gera um acréscimo brusco das pressões neutras no perfil de solo, o que acarreta a ruptura dos taludes devido à diminuição das tensões confinantes efetivas. A elevação gradual do nível de água também pode ser provocada pela formação de uma rede de fluxo paralela ou subparalela ao talude, sustentada por um horizonte menos permeável que o horizonte superficial.

O ***Mecanismo Alternativo***, que consiste na infiltração, com formação de frente de umedecimento em encostas sem nível de água pré-existente, foi proposto por Terzaghi (1950). Segundo Wolle (1988), sua primeira constatação foi na Serra do Mar, nas encostas adjacentes à Rodovia dos Imigrantes. Em solos não saturados, a eliminação ou mesmo a redução da sucção devido à infiltração das águas das chuvas provocam diminuição sensível e, até mesmo, anulação do intercepto de coesão. A ruptura ocorre quando a frente de umedecimento atinge uma profundidade crítica, na qual os parâmetros de resistência não mais garantem a estabilidade do talude.

Vaughan (1985) estudou extensos escorregamentos que ocorreram em taludes naturais de solos residuais em Fiji, um pequeno arquipélago no Pacífico Sul, no ano de 1980. Dados reportados em abril de 1980, durante a passagem do ciclone "Wally", mostraram eventos chuvosos excepcionais, num total de 1500 mm de água em três dias – no terceiro dia, choveu aproximadamente 1000 mm, dos quais 400 mm em 6 horas. De acordo com Vaughan (1985), a média anual de precipitação na região era de 2000 a 3500 mm. Apesar de terem sido realizadas investigações subsuperfíciais na região investigada, a experiência local evidenciava que os níveis de água eram profundos e que a maioria dos escorregamentos ocorreu em partes superiores dos taludes, descartando a hipótese de elevação do nível freático. Dessa maneira, Vaughan (1985) atribuiu os escorregamentos aos efeitos provocados pela infiltração das águas das chuvas, pelo avanço da frente de umedecimento até uma profundidade crítica do talude. Vaughan (1985) idealizou uma geração de pressão de água positiva decorrente de um possível decréscimo da permeabilidade com a profundidade. Existem várias outras possibilidades para se justificar o fenômeno observado por Vaughan (1985), sobretudo se forem usados conceitos de solos não saturados, conforme se mostrou nos itens anteriores.

A análise de estabilidade de taludes não saturados pode ser realizada por equilíbrio limite, similarmente ao que é feito para os solos saturados. A diferença básica é a consideração da

sucção na resistência do solo. Existem vários programas que realizam buscas automáticas da superfície de deslizamento crítica.

Vários autores, como Rahardjo *et al.* (1995), Fourie *et al.* (1999), Cho e Lee (2002), Duarte *et al.* (2005), Muntohar e Liao (2010), determinaram o fator de segurança com modelo simplificado de talude infinito. Adotando-se a envoltória de resistência proposta por Fredlund *et al.* (1978), o fator de segurança de um talude infinito é dado por:

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \alpha)\, tg\, \phi' + (u_a - u_w) tg \phi^b}{\gamma H \operatorname{sen}\alpha \cos\alpha} \quad (1)$$

Os escorregamentos rasos em solos coluvionares e residuais são muito comuns em regiões tropicais, associadas, principalmente, com períodos de precipitação intensa. Muitos desses casos podem ser interpretados por meio de taludes infinitos.

Uma vez definida a distribuição da sucção e os parâmetros de resistência, o cálculo do fator de segurança é uma tarefa simples. Mas para se ter uma representatividade da condição real, é preciso conhecer-se a distribuição espacial e temporal da sucção.

O cálculo de estabilidade deixa de ser uma análise única para um talude. Além disso, depende fundamentalmente da interação do talude com as condições climáticas associadas com a infiltração da água da chuva, a variação do nível freático ou outro mecanismo que altere a distribuição da sucção no solo. Em vista da importância da infiltração na estabilidade dos taludes não saturados, reservou-se a próxima seção para discutir exclusivamente esse tópico.

3 Causas de instabilização das encostas devido à infiltração

Dentre os agentes causadores de escorregamento em geral, pode-se dizer que, no caso de solos não saturados, o principal é a água. A instabilização pode se dar por infiltração (chuva, lançamento de águas servidas, ruptura de tubulações, etc.) ou pela subida do nível freático e consequente redução de sucção. Existem outras causas de escorregamentos que não estão relacionadas com infiltração, mas não farão parte do escopo deste capítulo.

A água pode ser tanto agente preparatório para o escorregamento, como deflagrador desse processo. Por isso, para se entender o comportamento de encostas em condições não saturadas, é fundamental entender como ocorrem a infiltração e a distribuição de umidade (ou grau de saturação ou sucção). Terzaghi (1950) identificou com muita clareza três causas de escorregamentos: interna, externa e intermediária. Dentre as causas, a água tem papel fundamental, pois pode tanto promover o aumento do peso específico devido ao aumento de umidade, como aumentar a pressão hidrostática em meios fraturados e gerar pressão de água positiva decorrente da percolação. No caso dos solos não saturados, a redução da resistência provocada pela queda de sucção pode comandar o processo de instabilização.

Existem tentativas de se correlacionar duração e intensidade de chuvas com escorregamentos. As propostas de Guidicini e Iwasa (1976) e Tatizana *et al.* (1987) são as mais difundidas na literatura nacional. As duas correlações foram desenvolvidas para a Serra do Mar, em Cubatão-SP, mas têm diferenças conceituais. Guidicini e Iwasa (1976) usaram como comparação as chuvas acumuladas a partir de julho até a data do evento.

Por outro lado, Tatizana *et al.* (1987) relacionaram a intensidade de chuva com a pluviometria acumulada nos quatro dias anteriores ao evento, conforme está apresentado na Figura 1. A proposta de Tatizana *et al.* (1987) pode ser melhor justificada conceitualmente, porque considera a infiltração dos dias que antecedem o escorregamento. Nas encostas não saturadas, as chuvas antecedentes são preparatórias, pois a infiltração promove o aumento do grau de saturação, ou a redução da sucção, que associada a uma chuva mais intensa, pode deflagrar o escorregamento.

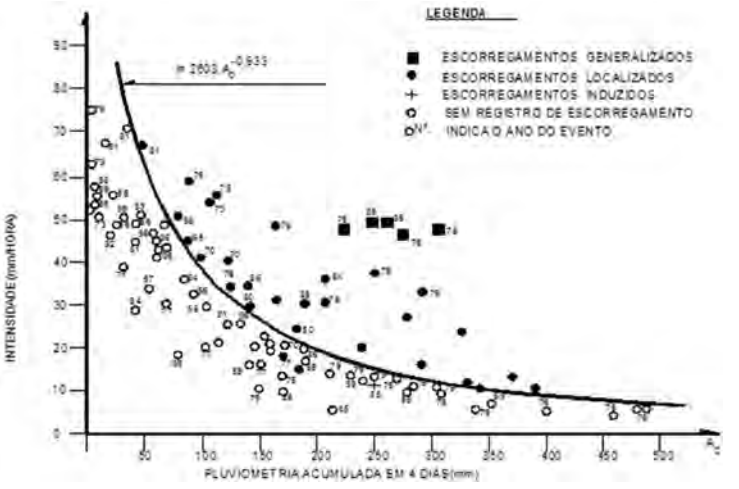


Figura 1. Correlação entre chuvas e escorregamentos que ocorrem na Serra do Mar, em Cubatão-SP (TATIZANA *et al.,* 1987).

Um exemplo que pode ser citado, para corroborar as hipóteses de Tatizana *et al.* (1987), foi registrado em Singapura. Rahardjo *et al.* (2001) apresentaram dados de chuva do Campus da University Nayang Technological, em Singapura, onde uma chuva, em fevereiro de 1995, de 94,6mm/dia foi suficiente para causar vários escorregamentos, ao passo que outras tempestades com praticamente a mesma intensidade (94 mm em novembro de 1993 e 83,2 mm em novembro de 1994) não causaram problemas significativos. Rahardjo *et al.* (2001) demonstraram que as chuvas acumuladas dos 5 dias anteriores foram preparatórias para que a precipitação do evento de pico deflagrasse o escorregamento em 1995, cujos valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Chuvas acumuladas e deflagradoras de escorregamento em Singapura (RAHARDJO *et al.*, 2001).

Ano	Evento pico da chuva	Precip. 5 dias
1993	94,0 mm	30 mm
1994	83,2 mm	20 mm
1995	94,6 mm	67 mm

A relação entre intensidade de chuva e sua duração também foi observada por meio de simulações numéricas. Cai e Ugai (2004) fizeram várias análises paramétricas de estabilidade para inferir o efeito da chuva em um talude com solo homogêneo de 10 m de altura com inclinação 1,5H:1V. Usaram três tipos de solos diferentes, cujos parâmetros para gerar a função de condutividade hidráulica (por VAN GENUCHTEN, 1980) estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Características hidráulicas dos solos (CAI e UGAI, 2004).

solo	α (m^{-1})	n	θ_r	θ_s	K_s (10^{-4} cm/s)
argiloso GCL	1,060	1,395	0,106	0,469	1,516
siltosa (USS)	7,087	1,810	0,049	0,304	18,292
areia (BLS)	2,761	3,022	0,044	0,375	63,832

Cai e Ugai (2004) realizaram análises de infiltração associadas com o cálculo do Fator de Segurança para definir as relações entre intensidade e duração que causam ou não escorregamentos. Essas informações podem ser interpretadas por meio da Figura 2. As análises foram realizadas para os três solos indicados na Tabela 2. Consideraram-se para os três solos os mesmos parâmetros de resistência (c' = 8 kPa, ϕ' = 25º e ϕ^b proporcional ao grau de saturação).

Os símbolos vazados na Figura 2 indicam valores de intensidades e as respectivas durações que não causaram escorregamentos, ao passo que essas mesmas relações com símbolos cheios forneceram fatores de segurança inferiores à unidade. Dessa forma, traçaram as curvas que dividem a região da Figura que podem ou não gerar escorregamentos. Comparando-se as Figuras 1 e 2, pode-se verificar que ambas apresentam a mesma tendência.

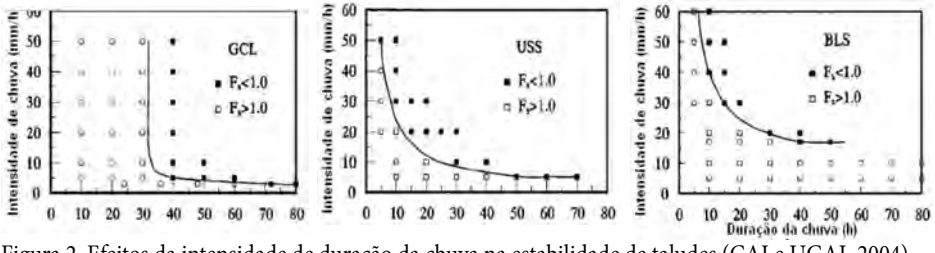


Figura 2. Efeitos da intensidade de duração da chuva na estabilidade de taludes (CAI e UGAI, 2004).

A correlação empírica (TATIZANA *et al*., 1987) indica que, quanto maior a pluviometria acumulada, a chuva deflagradora do escorregamento é proporcionalmente menor. Os estudos numéricos conduzidos por Cai e Ugai (2004) mostraram que, quanto maior a duração da chuva, menor é a intensidade de chuva requerida para causar o escorregamento. As duas análises dividem as regiões em que ocorrem ou não o escorregamento. Entretanto, os dados numéricos apresentam uma informação adicional: o resultado depende das características hidráulicas do solo. Se for possível generalizar os dados, a conclusão seria que taludes compostos por solos argilosos precisariam de chuvas com maior duração que solos mais permeáveis para se instabilizar. Porém, existem vários outros fatores que interferem nesse resultado, tais como os condicionantes geológicos e geotécnicos e o estado do solo na condição inicial de infiltração.

Outro exemplo de estudo numérico que focaliza a influência da intensidade da chuva na estabilidade de taludes não saturados é o artigo de Rahardjo *et al.* (2007). O talude estudado também foi considerado homogêneo com 10 m de altura, inclinação de 45º, parâmetros de resistência dados por: c' = 10 kPa e $\phi' = \phi b = 26^o$. As funções de permeabilidade adotadas simulam três solos cujas curvas estão apresentadas na Figura 3 (arenoso, siltoso e argiloso).

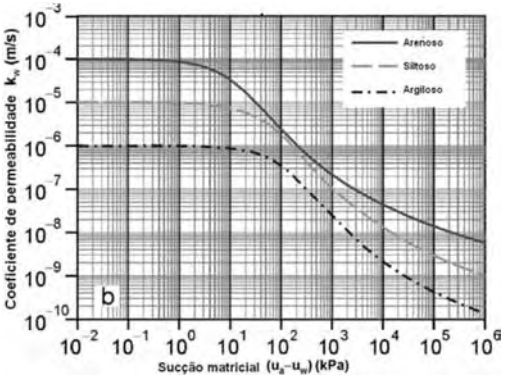


Figura 3. Curvas de condutividade hidráulica usadas por Rahardjo *et al.* (2007).

As simulações foram realizadas para diferentes intensidades e com duração máxima de 24h. Para cada etapa foi calculado o Fator de Segurança (FS). Os resultados estão mostrados na Figura 4.

Há um valor de intensidade inicial a partir do qual o FS começa reduzir; quando isso ocorre, à redução de FS é rápida. Outra constatação é de que há um valor de intensidade em que o FS é mínimo, a partir do qual há uma estabilização do FS com aumento da intensidade. Também fica evidente a influência da função de condutividade hidráulica, ou do próprio valor da permeabilidade saturada. Os solos mais argilosos apresentaram valores de FS (min) maiores que os solos com maiores valores de permeabilidade saturada. Esses dados indicam que solos mais arenosos podem ser mais instáveis que solos mais argilosos.

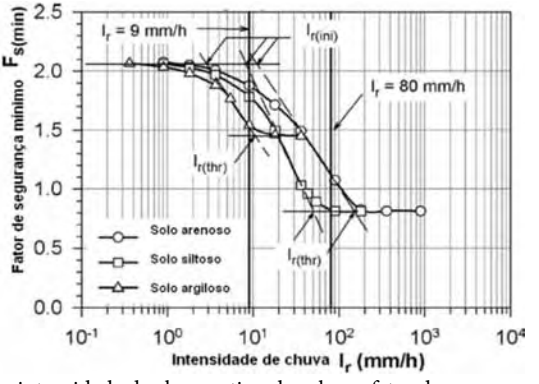


Figura 4. Relação entre intensidade de chuva e tipo de solo no fator de segurança mínimo Rahardjo *et al.* (2007).

Existem, porém, contraexemplos quando se analisam casos reais. Um deles foi apresentado por Matsushi *et al.* (2006). Ao estudarem os escorregamentos da Península de Boso, no Japão, Matsushi *et al.* (2006) verificaram que uma região apresentava menos escorregamentos que outra, mesmo com declividades e condições climáticas iguais. Em 20 anos, foram registrados 5,7 escorregamentos por km^2 nas encostas formadas por solo decomposto de arenito e 127,6 escorregamentos por km^2 quando as encostas eram cobertas por solos de origem de argilito. Esses dados não estão de acordo com o estudo teórico realizado por Rahardjo *et al.* (2007), mas podem ser explicados. A primeira diferença é que as encostas em Boso não são formadas por solos homogêneos; elas apresentam uma camada de solo sobreposta à rocha, conforme pode ser visto na Figura 5.

Outra diferença é o contraste de permeabilidade entre a capa de solo e o substrato rochoso. O arenito apresenta fraturas e, por isso, o contato solo-rocha é drenante; o argilito, ao contrário, forma uma barreira de baixa permeabilidade. Dessa forma, quando a mesma chuva atinge as duas encostas, o efeito é diferenciado. As instrumentações instaladas nas duas encostas por Matsushi *et al.* (2006) confirmam essas hipóteses. Na região do arenito, as pressões de água foram quase sempre negativas ao longo do período monitorado. Na região do argilito, ao contrário, as medições começaram registrando sucção e, após um período de chuvas, passou a indicar pressão de água positiva.

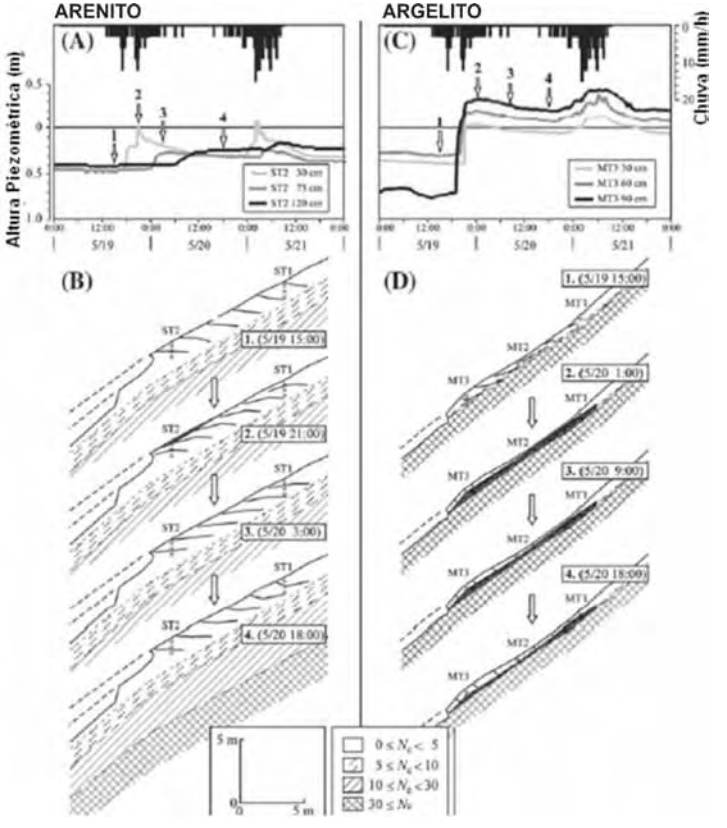


Figura 5. Pressão de água e infiltração da Península de Boso, no Japão (Matsushi *et al.*, 2006).

4 Influência da infiltração na instabilização das encostas

Como se mostrou na seção anterior, a infiltração pode ser um agente preparatório e também deflagrador dos escorregamentos em solos não saturados. Nesta seção, são apresentadas algumas análises numéricas mais específicas, com o intuito de entender como ocorre a distribuição da sucção (ou de umidade) ao longo do tempo.

Existem vários modelos simplificados que consideram uma frente de saturação devido à infiltração. Porém, em muitos casos, não se pode tomar como hipótese que o solo irá saturar durante a infiltração. A saturação só ocorreria se a chuva fosse suficientemente prolongada e, além disso, a intensidade da precipitação se aproximasse ou ultrapassasse o valor do coeficiente de permeabilidade saturada do solo na superfície.

Zhang *et al.* (2004) verificaram como se dá a variação do perfil de sução ao longo do tempo para comparar duas situações de infiltração: a) quando a intensidade pluviométrica é menor do que o coeficiente de permeabilidade saturado do solo (I < Ks) e b) quando a intensidade pluviométrica é maior ou igual ao coeficiente de permeabilidade saturado do solo (I ≥ Ks).

Quando I < Ks, a chuva não é suficiente para formar uma frente de saturação, por isso a sucção não se anula (Figura 6). A frente úmida eleva a umidade do solo em seu interior do valor inicial até um valor final, no qual a condutividade hidráulica iguala a velocidade de infiltração.

Quando I ≥ Ks, a chuva é suficiente para formar uma frente de saturação (Figura 7), a sucção se anula na superfície e há escoamento superficial quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo.

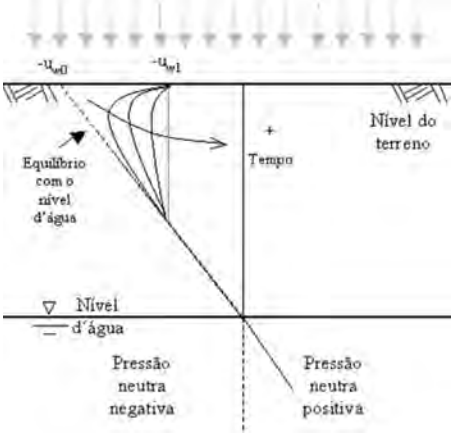


Figura 6. Perfil de sucção durante uma infiltração para a condição *q<ksat* (Modificado de ZHANG *et al.*, 2004).

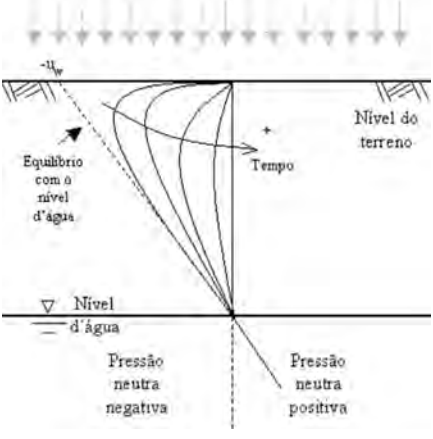


Figura 7. Perfil de sucção durante uma infiltração para a condição *q≥ksat* (Modificado de ZHANG *et al.*, 2004).

Cardoso Jr e Futai (2005) estudaram o efeito da infiltração em um talude com solo homogêneo e nível freático baixo, conforme ilustrado na Figura 8. Foram simulados numericamente dois solos típicos, um arenoso (solo A) e outro mais argiloso (solo B), cujas permeabilidades saturadas eram de 10^{-4} m/s e 10^{-8} m/s, respectivamente. Os parâmetros hidráulicos do solo para gerar as funções de condutividade hidráulica do solo estão apresentados na Tabela 3, e as respectivas curvas estão na Figura 9.

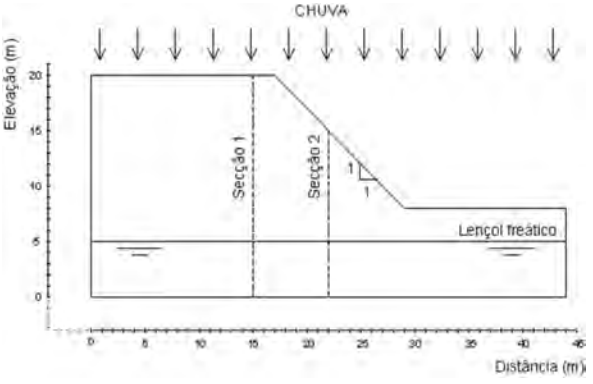


Figura 8. Geometria do talude homogêneo de referência para as simulações (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

As análises de fluxo foram realizadas através do programa Seep/W. Para cada caso, também foi calculado o fator de segurança pelo programa Slope/W, com o método de Bishop simplificado. Os parâmetros de resistência dos solos estão apresentados na Tabela 4. O nível freático foi mantido constante na posição indicada na Figura 8.

Tabela 3. Parâmetros hidráulicos dos solos analisados (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

Solo	α	n	m	θ_s	θ_r	K_s(m/s)
A	0,080	2,0	0,5	0,35	0,10	$1{,}0\text{x}10^{-4}$
B	0,013	3,0	0,67	0,40	0,17	$1{,}0\text{x}10^{-8}$

Tabela 4. Parâmetros de resistência dos solos analisados (CARDOSO JR; FUTAI, 2005).

	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ϕ^b (°)
Solo A	18,0	2,0	30,0	15,0
Solo B	18,0	5,0	25,0	15,0

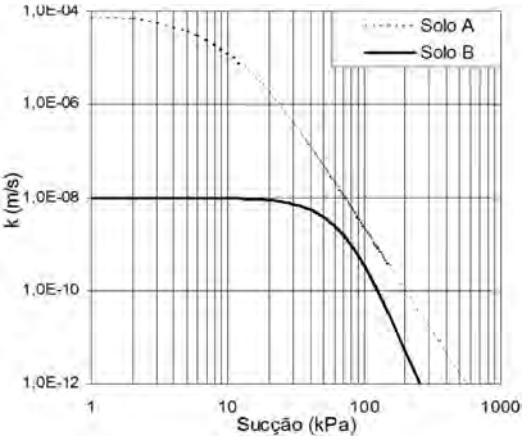


Figura 9. Características hidráulicas dos solos: função permeabilidade (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

Os fatores de segurança dos taludes são 1,53 e 1,44 para condição hidrostática (não saturada) e 0,80 e 0,82 para condição saturada, respectivamente para os solos A e B. Ou seja, um possível escorregamento só ocorreria sob condições não saturadas.

Os dados de pluviometria usados nas simulações foram definidos a partir da relação entre intensidade (I) e duração da precipitação (t) para a cidade de São Paulo, proposta por Silva *et al.* (1999), que é dada por:

$$I\,(mm/h) = 1998\frac{Tr^{0,106}}{(t+20,2)^{0,83}} \qquad (2)$$

O tempo de recorrência (Tr) usado foi de 10 anos.

Foram adotadas durações de chuvas entre 1 h até 150 dias para cobrir uma ampla faixa de possibilidades. Para cada caso, determinou-se a respectiva intensidade por meio da equação (2). Os dados de infiltração (pressão de água ou umidade) foram obtidos ao longo do tempo, não só durante a chuva, como também após ela ter cessado. As variações dos fatores de segurança ao longo do tempo estão apresentadas nas Figuras 10 e 11 para os solos A e B, respectivamente.

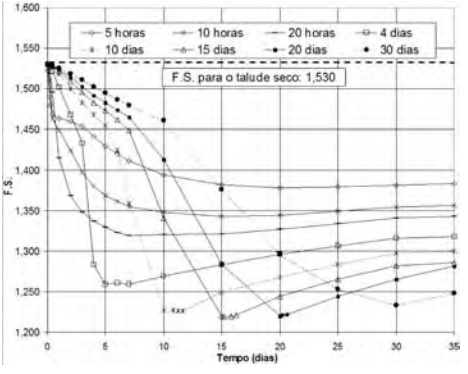


Figura 10. Variação do fator de segurança ao longo do tempo para diversas precipitações e suas respectivas durações (Solo A). (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

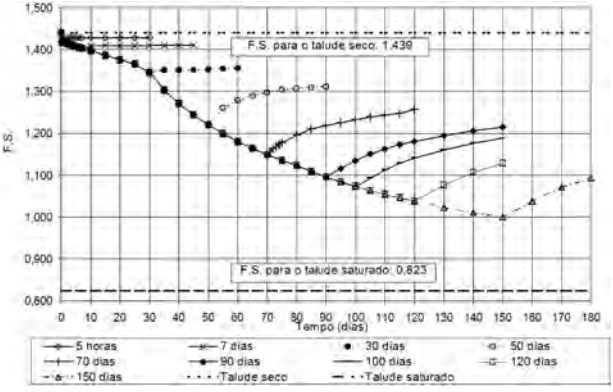


Figura 11. Variação do fator de segurança ao longo do tempo para diversas precipitações e suas respectivas durações (Solo B). (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

Os tempos indicados nas legendas das Figuras 10 e 11 referem-se ao tempo de duração da chuva. Tomando como exemplo a precipitação com duração de 20 horas do solo A (Figura 10), que corresponde a uma intensidade de $1{,}88 \times 10^{-6}$ m/s, o mínimo FS corresponde ao valor de 1,32 que ocorre para o tempo de aproximadamente 6 dias após a chuva ter cessado. Esse comportamento pode ser explicado a partir dos perfis de sucção apresentados na Figura 12. Após 10 horas do início da precipitação, a sucção na superfície do talude diminui de 150 para aproximadamente 15 kPa. No final da chuva (20 horas), a frente de umedecimento avançou aproximadamente 3 metros para a secção 2 da Figura 8, como apresentado na Figura 12. Após a chuva ter cessado, a sucção na superfície começa a aumentar, enquanto a sucção ao longo da profundidade continua diminuindo. Após aproximadamente 3 dias da chuva ter cessado, a sucção a 3 metros de profundidade diminui de 70 para 38 kPa (Figura 12). Essa perda de sucção provoca a queda na resistência do solo e, consequentemente, a queda do FS.

Fazendo a mesma análise para o solo B e tomando como exemplo a duração da precipitação de 30 dias com intensidade de $9{,}57 \times 10^{-8}$ m/s, o mínimo FS é igual a 1,35 e ocorre imediatamente após a chuva ter cessado. Esse solo se comporta de maneira distinta em relação ao solo A para os intervalos das precipitações analisadas. Após a chuva ter cessado, a sucção na superfície aumenta, fazendo com que o FS aumente imediatamente.

Esse comportamento diferenciado do solo B pode ser explicado pelos valores das intensidades das precipitações que foram todas maiores do que a sua condutividade hidráulica saturada ($k_s = 10^{-8}$m/s). De acordo com Zhang *et al.* (2004), o desenvolvimento da frente de umedecimento anula o valor da sucção no interior do talude (Figura 6).

Provavelmente, o fator de segurança mínimo será atingido para uma duração de chuva na qual o volume de água infiltrada é capaz de saturar o interior do maciço.

O perfil de sucção para a secção 2 (Figura 8), para um período de chuva de 70 dias, está apresentado na Figura 13. O comportamento da frente de umedecimento é bastante similar ao comportamento ilustrado na Figura 7. Nesta secção, no final da chuva (70 dias), sua sucção máxima é de aproximadamente 35 kPa.

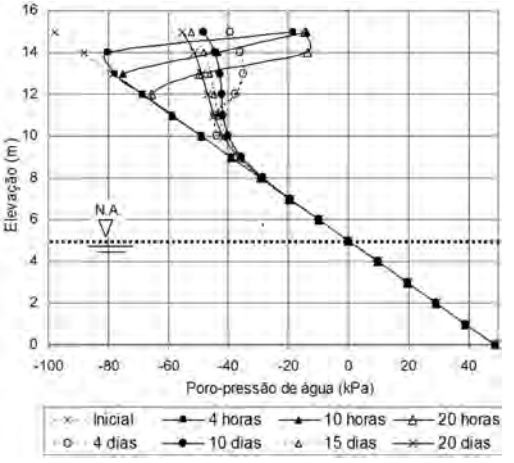


Figura 12. Perfil de sucção *versus* elevação para uma precipitação de 1,88x10^{-6} m/s com duração de 20 horas ao longo do tempo: secção 2 para o solo A (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

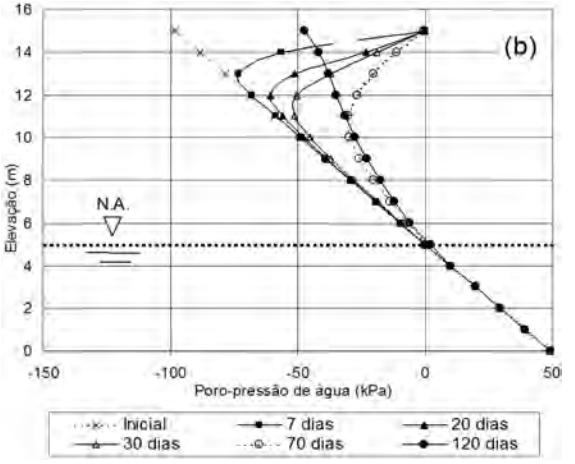


Figura 13. Perfil de sucção versus elevação para uma precipitação de 4,72x10^{-8} m/s com duração de 70 dias ao longo do tempo, secção 2 para o solo B (CARDOSO JR e FUTAI, 2005).

Comparando os resultados obtidos por Cardoso e Futai (2005), pode-se verificar a diferença do comportamento de um talude mais arenoso (solo A) e mais argiloso (Solo B). Para as condições analisadas, o solo argiloso apresenta maior possibilidade de ruptura, o que seria um resultado oposto ao sugerido por Rahardjo *et al.* (2007). Entretanto, esse resultado pode ser explicado, porque a chuva variou de intensidade e manteve-se na mesma duração (24 h). Esse resultado demonstra a importância de se considerar a intensidade e duração das chuvas. O mesmo talude com as mesmas características mecânicas e hidráulicas pode ter comportamento diferente dependendo das condições climáticas. Além disso, as conclusões apresentadas por Cardoso e Futai (2005) dependem da condição inicial – no caso, a distribuição inicial da sucção adotada foi a hidrostática.

Após a constatação da importância da intensidade e a duração da chuva em 2005, Cardoso Jr. e Futai (2009) fizeram outras análises do efeito da infiltração em taludes não saturados, usando dados reais de precipitação para a cidade de São Paulo.

Para investigar os efeitos de duração de chuva na estabilidade da encosta, Ng e Shi (1998) adotaram chuvas com período de retorno de 10 anos, considerando que a intensidade da chuva é igual à taxa de infiltração, conforme indicado na Figura 14. Esses dados foram utilizados para realizar a análise de infiltração para diferentes durações e calcular o fator de segurança ao final da chuva (Figura 15). Ao final de cada período de chuva, foi adicionada uma tempestade de duração de 2 horas com intensidade de 74 mm/h, para avaliar a influência da infiltração das chuvas antecedentes no fator de segurança. A seleção de chuvas de duas horas foi baseada em estudo de Brand *et al.* (1984), que concluiu que tempestades de curta duração têm maior impacto sobre a estabilidade. Ng e Shi (1998) concluíram que, de acordo com o esperado, a chuva de 2 horas afeta o fator de segurança com ou sem chuva antecedente, mas sua influência sobre o fator de segurança depende da duração da chuva antecedente.

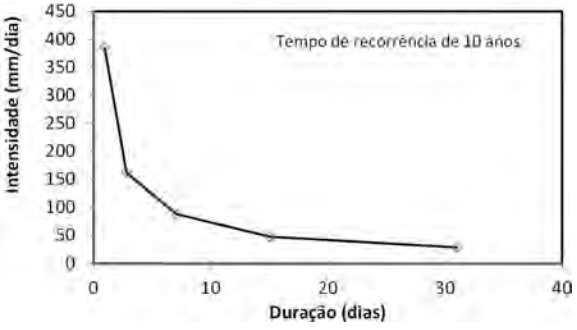


Figura 14. Relação entre intensidade e duração da precipitação usada por Ng e Shi (1998).

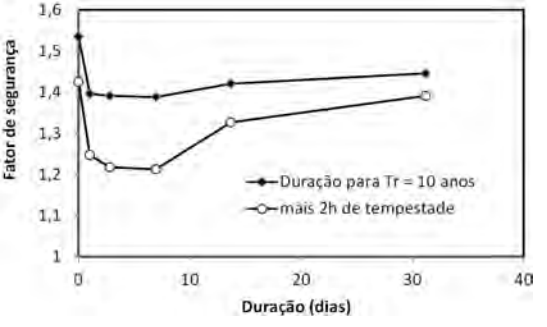


Figura 15. Variação do fator de segurança com a duração da chuva (NG e SHI, 1998).

Para uma precipitação antecedente menor que a duração crítica, a queda no fator de segurança causado pela tempestade aumenta com a duração, como mostrado na Figura 15. Por outro lado, torna-se menor quando a duração de um evento de precipitação antecedente é maior que o valor crítico. A maior influência da tempestade se dá justamente no período de duração crítico, que, para o local estudado, é de 3 a 7 dias (Figura 15). Essa duração crítica confirma a utilização da chuva acumulada de 4 dias usada na correlação proposta por Tatizana *et al.* (1987).

5 Escorregamentos em encostas não saturadas decorrentes de infiltração

Os escorregamentos em condições não saturadas ocorrem, em geral, nas encostas formadas por solos espessos e com nível freático profundo, sem que haja condicionantes geológico-geotécnicos para se desenvolver um nível freático suspenso. Alguns exemplos são os taludes de cortes de algumas estradas. Outra condição possível ocorre nas encostas muito íngremes, que apresentam inclinações muito superiores ao ângulo de atrito e mantêm-se estáveis pelo efeito da sucção.

É incomum usar os conceitos de solos não saturados em projetos de estabilidade de taludes. A maior parte dos estudos que pode ser encontrada na literatura é sobre retroanálises de escorregamentos ou monitoramento associado com análise de estabilidade.

As primeiras retroanálises em taludes não saturados foram realizadas com os métodos tradicionais de análise limite ajustando valores da coesão aparente para obter FS=1. Dessa forma, era possível estimar um valor de sucção média para o talude no momento do escorregamento.

Conforme discutido na seção anterior, a sucção varia temporalmente e também com a profundidade em função da infiltração que ocorre ao longo do tempo. Assim, a profundidade do escorregamento também pode ser condicionada pela distribuição da sucção, o que não pode ser avaliada por uma análise mais simplificada.

Na Tabela 5, estão apresentados alguns casos brasileiros históricos de escorregamentos ocorridos na década de 1970. Foram muito analisados por vários pesquisadores, porque foram as primeiras evidências de escorregamentos em condições não saturadas. Além desses casos, reuniram-se outros casos da literatura mais recentes. Os detalhes das características dos solos, os resultados dos ensaios, as características dos escorregamentos e as análises realizadas podem ser consultados nas referências indicadas na Tabela 5. O objetivo da Tabela 5 é sintetizar algumas características para poder comparar os casos.

Fontoura *et al.* (1984) analisaram alguns escorregamentos que ocorreram sob condições não saturadas, apresentadas na Tabela 5, como Catingueiro-RJ (CAMPOS, 1974), Jequiá-RJ (MATTOS, 1974) e Túnel 6 em Cubatão-SP (WOLLE, 1980). Concluíram que, no momento do escorregamento, o solo ainda estava em condições não saturadas. Esses mesmos casos foram reanalisados por Campos (1984), usando outra metodologia. Em vez de realizar análises de estabilidade com parâmetros saturados ou não saturados, ou realizar a retroanálise dos parâmetros de resistência que conduziram ao deslizamento, Campos (1984) adotou um valor de ϕ^b de 15º e determinou o valor da sucção que causaria o escorregamento. Desse modo, há duas simplificações que influenciariam no resultado: o próprio valor de ϕ^b e a sucção constante em todo talude. Mesmo assim, quando a inclinação do talude é elevada, é possível afirmar que o escorregamento ocorreu sem gerar pressões positivas de água nos poros.

Na Tabela 5, também estão apresentados cinco casos de escorregamento que ocorreram em Salvador. Um deles – a encosta do Alto do Bom Viver – foi apresentado por Presa e Silva (1978) e foi retroanalisado por Campos (1984) e Jesus (2008). Esse caso está melhor detalhado no capítulo que trata de escorregamentos causados por infiltração antrópica (Capítulo 25). Os demais casos foram estudados por Jesus (2008). Os taludes de Salvador apresentam solos espessos e nível freático profundo; por isso, mantêm-se não saturados em grande parte do tempo.

Outro caso apresentado na Tabela 5 é o talude que escorregou na SP318 e foi investigado por Calle (2000) com pleno uso dos conceitos da mecânica dos solos não saturados. O talude era bastante íngreme (64º de inclinação) e verificou-se uma trinca de tração de quase 4 m, conforme indicado na Figura 16. O solo era arenoso, podendo ser considerado um talude homogêneo e com nível freático profundo, como se pode ver na Figura 17.

Calle (2000) realizou ensaios com sucção controlada (curva de retenção em ensaios triaxiais) e, assim, foi possível usar os conceitos de solos não saturados de forma mais avançada. O FS calculado com parâmetros saturados é 0,64, o que justifica a hipótese de que o escorregamento ocorreu em condição não saturada. Para explicar o escorregamento, Calle (2000) realizou análises de fluxo transiente associado com cálculo de estabilidade. Adotou várias hipóteses de intensidade e duração da chuva, sem se preocupar com as relações intensidade e duração possíveis. Chegou à conclusão de que duas chuvas poderiam ter causado o escorregamento: 2 h de chuva com intensidade de 70 mm/h ou 15 h de chuva com intensidade 20 mm/h. Os dados obtidos por Calle (2000) foram aqui comparados com a correlação entre intensidade e duração da chuva, sugerida por Barbassa (1991), para São Carlos, cujo resultado está mostrado na Figura 18.

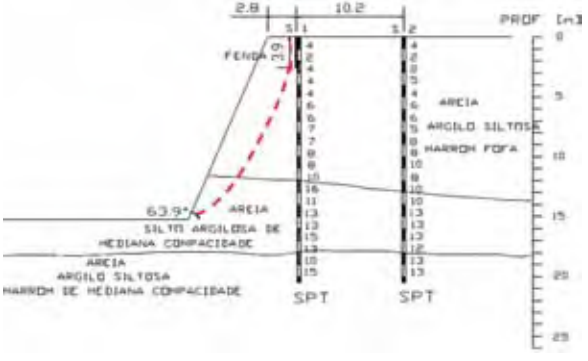


Figura 16. Seção geotécnica do escorregamento da SP318 (CALLE, 2000).

Figura 17. Foto do escorregamento da SP318 (CALLE, 2000).

A intensidade e as durações usadas por Calle (2000) correspondem a tempos de recorrência teóricos de 615 anos para chuva de 2 h (intensidade de 70 mm/h) e 5825 anos

para 15 h de chuva com intensidade de 20 mm/h. Portanto, é mais provável que uma chuva de 2 h tenha causado o escorregamento. Contudo, várias outras combinações também seriam possíveis.

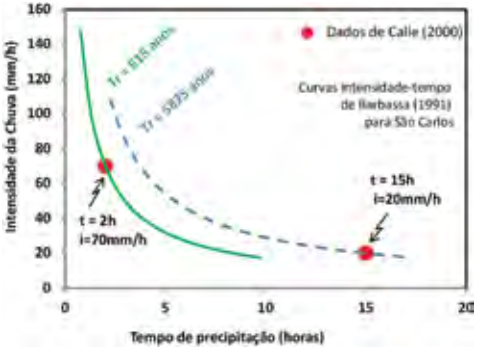


Figura 18. Comparação das curvas intensidade e duração da chuva com os valores usados por Calle (2000).

Esse resultado confirma a necessidade de se conhecerem os dados climáticos, os quais interferem na infiltração, conforme foi discutido nas seções 3 e 4 (ZHANG *et al.*, 2004; CARDOS JR e FUTAI, 2005; NG e SHI, 1998; CAI e UGAI, 2003).

Um caso de escorregamento retrogressivo sob condições não saturadas, apresentado na Tabela 5, provocou o avanço de um processo de voçorocamento em Outro Preto, relatado por Futai *et al.* (2005). Esse caso foi amplamente investigado com a realização de ensaios para a caracterização do solo (físico, química e mineralógica), parâmetros hidráulicos (permeabilidade, curva de retenção e função de condutividade hidráulica) e de resistência (ensaios triaxiais com controle de sucção).

Os autores mostraram que, ao longo de um período chuvoso, o FS (=1,5) reduz até o escorregamento após 12 dias de chuvas. Foi realizada outra análise de estabilidade com alteração da geometria através da remoção do solo escorregado. Simulou-se a secagem do solo por dois dias e verificou-se que o novo período de chuva poderia provocar outro escorregamento. Esses dados estão apresentados na Figura 19.

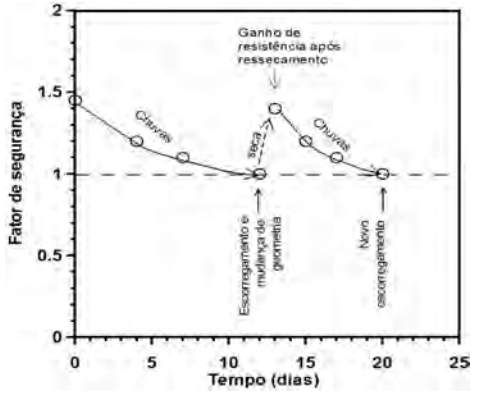


Figura 19. Variação do Fator de segurança com o tempo (FUTAI *et al.*, 2005).

Os escorregamentos que ocorrem na Serra do Mar no trecho paulista, em Cubatão-SP, têm características diferentes dos demais casos, como mostra a Tabela 5. O local foi extensivamente estudado por Wolle (1988) por meio de ensaios em campo, laboratório e medidas de sucção. O caso é importante pelo pioneirismo na aplicação, de forma tão abrangente, dos conceitos de mecânica dos solos não saturados no Brasil. Wolle (1988) apresentou sete escorregamentos com características semelhantes: dois no Vale do rio Moji, três no Vale de Cubatão, um no Vale do Pereque e um no Vale do Rio das Pedras. As espessuras médias dos solos coluvionares eram de 1,5 m. Os escorregamentos foram translacionais em encostas com inclinações entre 40º e 50º, comprimentos de 40 m a 150 m e larguras de 7 m a 20 m. Uma particularidade do perfil geotécnico desse local é que a permeabilidade cresce com a profundidade.

A matriz do solo residual tem a mesma ordem de grandeza da permeabilidade saturada do solo coluvionar, mas apresenta fissuras. A rocha é fraturada e muito drenante, de acordo com Wolle (1988), que relatou que o nível freático fica na rocha fraturada a 30 m de profundidade. Assim, não é possível se desenvolver mecanismo de escorregamento associado com elevação do nível d'água, porque a permeabilidade decresce com a profundidade.

Tabela 5. Casos, na literatura, de escorregamentos que ocorreram sob condição não saturada.

Local	Referência	Características do solo	Talude e Escorregamento
Catingueiro Barra do Pirai-RJ	Rocha Fo (1973), Campos (1974), Fontoura *et al.* (1984), Campos (1984)	Solo residual de migmatito. Composição mineralógica complexa (predominância de biotita, quartzo, feldspato e granada e minerais argilicos: ilita, caulinita e também montmorilonita) Umidade natural c = 35,3kPa, ϕ = 19,9º Inundado c' = 24,4kPa, ϕ'= 20,6º Resistência residual c = 0, ϕ = 14,3º	Nível d'água profundo 70.000m3, condicionado pela camada micácea Campos (1984) estimou uma sucção de 70,6kPa, usando parâmetros de resistência residual
Jequiá, Ilha do Governador-RJ	Mattos (1974), Campos (1984)	Solo residual arenoso Umidade natural c = 44,1kPa, ϕ = 30º Inundado c' = 14,7kPa, ϕ' = 30º	5.000m3, Talude de 50º com 40m de altura. FS_{sat}=0,92. Sucção na ruptura obtida por Campos (1984) 22,8kPa
Túnel 6 Cubatão Serra do Mar-SP	Wolle (1980, 1988), Fontoura *et al.* (1984), Campos (1984)	Solo coluvionar com espessura média de 1m sobreposto ao solo residual. Permeabilidade cresce com a profundidade. Inundado c' = 1kPa, ϕ'= 34º	Escorregamento translacional, inclinação média de 40º. FS_{sat} = 0,91 (talude infinito) FS_{sat} =1,0 (3D) (Wolle, 1988). Sucção de 2,4kPa (CAMPOS, 1984).
Vale do Rio Cubatão-SP	Wolle (1988)	Solo coluvionar com espessura média de 1m sobreposto ao solo residual. Permeabilidade cresce com a profundidade. Inundado c' = 1kPa, ϕ'= 36º	Escorregamento translacional, inclinação média de 40º FS_{sat} = 0,88 (talude infinito) FS_{sat} =1,0 (3D)

(continuação)

Local	Referência	Características do solo	Talude e Escorregamento
Maciço do Julião Salvador-Ba	Presa e Silvia (1978), Campos (1984)	Localizado na linha de falha de Salvador. Solo decomposto de granulito (2m de solo superficial silte argiloso seguido do solo residual silte arenoso. Umidade natural c=22,5kPa, ϕ=29º , Inundado c'=17,6kPa, ϕ'=25,4º	3.000m^3, inclinação de quase 50º. O escorregamento ocorreu após chuvas intensas e prolongadas. Sucção estimada por Campos (1984) = 55,7kPa FS_{sat}=0,70 e FS_{nat}=1,35 (JESUS, 2008)
Alto do Bom Viver Salvador-Ba	Jesus (2008)	Solo residual de granulito Inundado: c' = 23,7kPa, ϕ'= 27,1º	Inclinação 40º , altura de 50m. Nível d'água não detectado nas sondagens. FS_{sat}=0,94 e FS_{nat}=1,13
Av. Suburbana Salvador-Ba	Jesus (2008)	Solo residual silte-arenoso Inundado: c' = 6,5kPa, ϕ'= 31,6º	Inclinação 53º, altura de 30m. Nível d'água não detectado nas sondagens.FS_{sat}=1,01
Morro do Gavazza-Ba	Jesus (2008)	Solo residual maduro silto-argiloso Umidade natural c = 41,2kPa, ϕ = 23,9º Inundado c' = 0,3kPa, ϕ'= 25,2º	Inclinação 70º , altura de 20m. Nível d'água não detectado nas sondagens. FS_{sat}=1,01 e FS_{nat}=2,07
Morro da Poêmica Salvador -Ba	Jesus (2008)	Solo residual maduro silto-argiloso Umidade natural c = 27,4kPa, ϕ = 38,6º Inundado c' = 12,2kPa, ϕ'= 33,4º	Inclinação 42º , altura de 15m. FS_{sat}=0,91 e FS_{nat}=1,54
SP318 São Carlos-SP	Calle (2000)	Areia argilosa marrom. Ensaio: curva de retenção, ensaios triaxiais com sucção controlada. Monitoramento da sucção. c'=16kPa, ϕ'=35º, ϕ^b=20º	Nível freático abaixo do pé do talude, 15m de altura e inclinação de 64º FS_{sat} = 0,64 e FS_{nat}=1,13
Espinhaço da Gata Recife-PE	Coutinho e Severo (2009)	Solo residual com espessura média de 10m. Presença de mica. c' = 2,9kPa, ϕ'= 29,6º	50.000m3, Inclinação 32º, altura de 80m. Sucção menor que 10kPa. Escorregamento no contato solo-rocha. Sucção obtida por análise de fluxo.
Outo Preto-MG	Futai *et al.* (2005)	Solo residual de gnaisse espesso. Funções de permeabilidade, curva de retenção, ensaios triaxiais com sucção controlada. c' = 2kPa, ϕ' = 31,6º, ϕ^b= 11º	Escorregamentos rasos e retrogressivos. Nível d'água próximo ao pé do talude Inclinação 40º, altura de 30m. FS_{sat} = 0,84 eFS_{nat}=1,5
Vista Chinesa Maciço da Tijuca-RJ	Rocha *et al.* (1992), Duarte *et al.* (2005)	Sequencia de colúvio, solo residual rocha alterada e rocha sã. Permeabilidade do colúvio e do solo residual da mesma ordem de grandeza. c' = 5,5kPa, ϕ' = 26º, ϕ^b= 19,5º	Escorregamento translacional com espessuras entre 1 a 2m (colúvio). Inclinação 45º Talude infinito: FS_{nat} = 2,44 e FS_{sat}=0,88 3D: FS_{nat} > 2,4 e FS_{sat}=1,02 (médio)

Na Figura 20, está apresentada a planta topográfica realizada por Wolle (1988), para definir a área de um dos escorregamentos no Vale do Rio Cubatão. Esse foi o relato de escorregamento com maior número de informações apresentado por Wolle (1988), razão pela qual foi selecionado para ser apresentado neste artigo. A cicatriz mostrada na Figura 20 foi produzida por um escorregamento translacional em março de 1986. A espessura de solo coluvionar tem

em média 1 m de espessura sobreposta ao solo residual, como se pode ver na seção longitudinal apresentada na Figura 21. O escorregamento engloba basicamente o solo coluvionar na forma de calha com 8 m de largura e 40 m de comprimento.

Wolle (1988) mediu a sucção em quatro profundidades ao longo de seis meses em 1987, como pode ser visto na Figura 22. Dois dos tensiômetros estavam localizados no solo coluvionar, e os outros dois no solo residual. Wolle (1988) concluiu que as sucções no solo coluvionar são nitidamente menores que no solo residual e a sucção aumenta com a profundidade. O monitoramento ao longo do tempo indicou que a elevação da sucção depois de cessada a chuva é lenta, porém a queda da sucção durante a chuva é rápida. Após longos períodos de chuva, foram medidas sucções nulas até 1 m de profundidade, mas nunca foram observadas pressões de água nos poros positivos, porque, mesmo se houvesse fluxo saturado, as linhas seriam verticais.

Wolle (1988) analisou a estabilidade de dois casos de Cubatão, o Túnel 6 e a Área Piloto 2 (Figuras 20 e 21). Os valores dos fatores de segurança obtidos por meio de talude infinito com parâmetros saturados forneceram valores abaixo da unidade (Tabela 5), o que poderia justificar um escorregamento em situação não saturada. Campos (1984) fez essa suposição e retroanalisou um valor de sucção. Entretanto, Wolle (1988) apresentou outra hipótese com uma justificativa teórica bem fundamentada. Para isso, ele desenvolveu um modelo simplificado de análise tridimensional, admitindo a superfície de deslizamento com forma de calha retangular. A partir desse modelo, ele conseguiu demonstrar que há uma largura da massa que desliza, cujo fator de segurança é unitário em condição saturada.

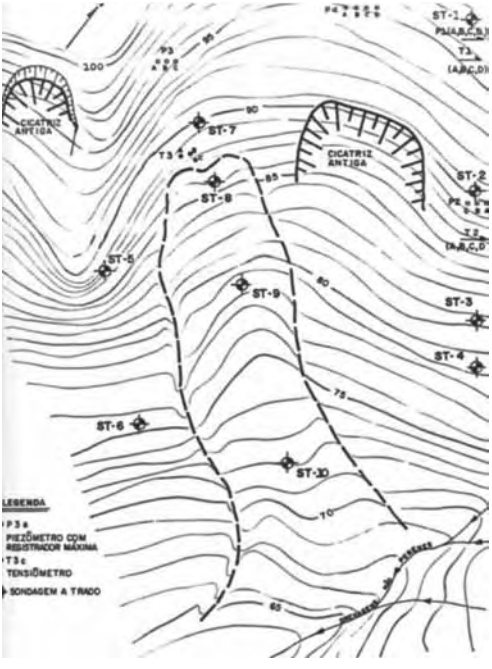


Figura 20. Planta dos escorregamentos ocorridos na encosta esquerda do Vale do Rio Cubatão (WOLLE, 1988).

Como mostrado na Figura 22, Wolle (1988) verificou que a sucção em campo pode se anular, corroborando essa metodologia de análise. Assim, o mecanismo que deflagra o escorregamento é a saturação do solo coluvionar superficial promovida pela infiltração. O mecanismo no qual a frente de umedecimento pode chegar ao limite de saturar o solo depende das características hidráulicas do solo e também da intensidade e duração da chuva. Esse mecanismo não é tão fácil de ser confirmado, pois pode haver incerteza sobre os parâmetros do solo, a geometria e a precipitação para se inferir esse modelo. Porém, existem outros exemplos que podem confirmar a existência desse mecanismo, tais como os casos de: Salvador (Av. Suburbana e Morro do Gavazza citados por JESUS, 2008); Espinhaço da Gata (COUTINHO e SEVERO, 2009); Vista Chinesa (DUARTE *et al*., 2005), cujas informações estão sintetizadas na Tabela 5. Em resumo, pode-se dizer que a primeira providência para saber se um talude necessita da contribuição da sucção para se manter estável é realizar análise de estabilidade com os parâmetros de resistência efetivos saturados sob condições drenadas. Para reduzir as incertezas, é possível listar os casos da Tabela 5 cujos fatores de segurança são inferiores a 0,95 na condição saturada: Jequiá, Maciço do Julião, Alto do Bom Viver, Morro da Polêmica, SP318 e Outro Preto. Esses seis casos eram estáveis devido à sucção, e a infiltração causou redução da sucção até o escorregamento, mas sem que a sucção se anulasse.

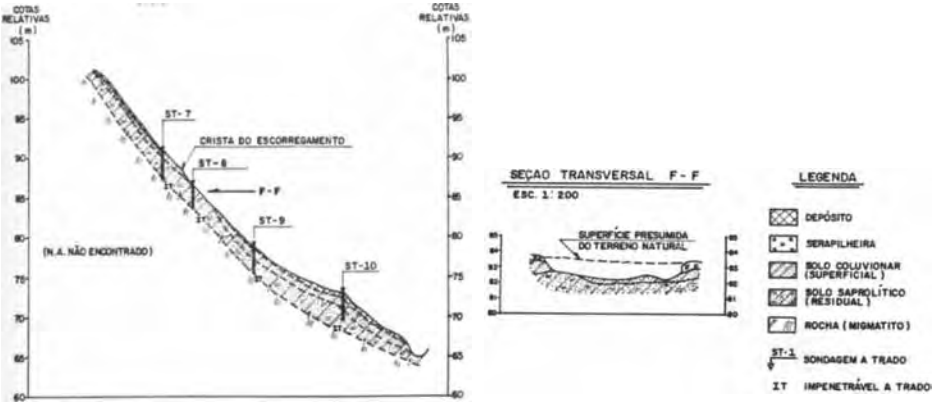


Figura 21. Seções geotécnicas dos escorregamentos ocorridos na encosta esquerda do Vale do Rio Cubatão (WOLLE, 1988).

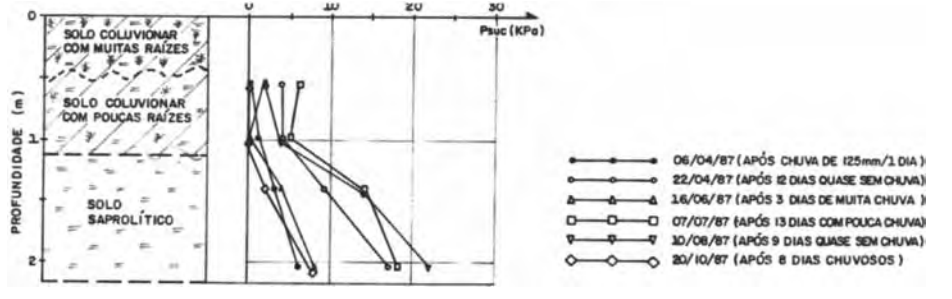

SOLO COLUVIONAR COM MUITAS RAÍZES
SOLO COLUVIONAR COM POUCAS RAÍZES
SOLO SAPROLÍTICO
PROFUNDIDADE (m)
Psuc (KPa)
06/04/87 (APÓS CHUVA DE 125mm/1 DIA)
22/04/87 (APÓS 12 DIAS QUASE SEM CHUVA)
16/06/87 (APÓS 3 DIAS DE MUITA CHUVA)
07/07/87 (APÓS 13 DIAS COM POUCA CHUVA)
30/08/87 (APÓS 9 DIAS QUASE SEM CHUVA)
20/10/87 (APÓS 8 DIAS CHUVOSOS)

Figura 22. Medidas de sucção da encosta esquerda do Vale do Rio Cubatão (WOLLE, 1988).

Nos casos citados, as condições do solo ou do clima ou ambos não geram frentes de umedecimento capazes de saturar o solo. Analisando esses casos, é possível subdividir esses escorregamentos naqueles que escorregam em condições não saturadas e aqueles que podem escorregar com sucção nula. Essas condições dependerão das características hidráulicas do solo (curva de retenção, permeabilidade saturada e função de condutividade hidráulica) e das condições ambientais. Nessa etapa, é bom relembrar o que foi apresentado na seção 4, na qual se mostrou a importância da relação entre a intensidade da chuva e a permeabilidade saturada para saber se haverá uma frente de saturação do solo ou não.

Neste capítulo, foram reunidos os casos nos quais as pressões de água nos poros não se tornam positivas, podendo no máximo se anular. No Capítulo 25 serão apresentados outros casos nos quais só a pressão positiva explicaria o escorregamento.

Conclusões

Neste capítulo, discutiram-se os agentes preparatórios e deflagradores de escorregamentos em taludes não saturados. Deu-se especial destaque à infiltração e às relações entre intensidade de chuva e duração. Grande parte das informações foi gerada por estudos numéricos. Explicou-se a funcionalidade de algumas correlações empíricas, como, por exemplo, porque chuvas acumuladas em alguns dias são importantes agentes preparatórios para que uma chuva principal cause o escorregamento.

Foram discutidos alguns casos de escorregamentos que ocorrem sob condição não saturada ou sucção nula decorrente de infiltração. Em todos os casos, foi demonstrada a importância de se considerar a condição não saturada do solo na interação com as condições ambientais.

Em condições específicas, há contribuição da sucção para garantir a estabilidade de taludes. Para isso, os taludes devem ser homogêneos, com nível freático profundo. As características hidráulicas do solo comparadas com as intensidades de chuva devem ser tais que a sução não seja anulada pela infiltração. Quando a permeabilidade do solo é menor ou igual à intensidade da chuva e a estação de chuva é caracterizada por períodos de chuva prolongados, o talude pode ter a sucção anulada.

Há, portanto, alguns casos em que seria possível usar a contribuição da sucção na estabilidade dos taludes, o que deve ocorrer em muitos taludes de corte rodoviários. Mas há casos, conforme descritos na seção 6, em que o escorregamento se dá por saturação; nesse caso, a análise seria muito simplificada, bastando usar parâmetros efetivos do solo saturado. Por fim, há situações em que a encosta oscila entre não saturada e com formação de rede de fluxo.

É importante que se tome muito cuidado ao tentar utilizar parâmetros do solo na umidade natural e chamar esse resultado de análise de estabilidade em condições não saturada. Como se mostrou, o FS varia sazonalmente, e é muito provável que haverá uma condição muito mais crítica que a obtida por meio dessa análise.

É preciso se pensar em formas de se manter uma sucção mínima e confiável nos taludes para que possam ser usados os benefícios do ganho de resistência do solo decorrentes da sucção.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e ao REAGEO/INCT pelo auxílio financeiro. O primeiro autor agradece aos seus alunos Flávio Franch e Silvia Suzuki, que realizaram trabalhos na área de estabilidade de taludes cujos resultados foram citados neste livro. Agradecem também ao Prof. Cláudio Wolle, que sempre tem colaborado com nosso grupo de pesquisa.

Referências bibliográficas

BARBASSA, A. P. (1991). Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos, SP. Tese (Doutorado em Geotecnia), EESC-USP, São Carlos

BRAND, E. W. (1984). Landslides in south Asia: a state-of-art report. Proc. 4th Int. Sym.on Landslides, Toronto, v. 1, p. 17-59.

CAI, F.; UGAI, K. (2004). Numerical analysis of rainfall effects on slope stability. International Journal of Geomechanics, v. 4, n. 2, p. 69-78.

CALLE, J. A. C. (2000). Análise de ruptura de talude em solo não saturado. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), EESC-USP, São Carlos.

CAMPOS, L. E. P. (1984). Influência da sucção na estabilidade de taludes naturais em solos residuais. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CAMPOS, T. M. P. (1974). Resistência ao cisalhamento de solos residuais micáceos. Tese Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARDOSO JUNIOR, C. R.; FUTAI, M. M. (2005). Simulação do efeito de um fluxo transiente na estabilidade dos taludes. *In:* V Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, Salvador. São Paulo, p. 123-131.

CARDOSO JUNIOR, C. R.; FUTAI, M. M. (2009). Estudo da variação da sucção ao longo do ano de um talude de solo residual. In: 5ª. Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, São Paulo, ABMS, v. 1, 123-131.

CHO, S. E.; LEE, S. R. (2002). Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. Journal of Geot. And Geoenv. Eng. v. 128, n. 9, p. 756-763.

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. (2009). Investigação geotécnica para estabilidade de encosta. *In:* V Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, ABMS, São Paulo. p. 19-74.

DUARTE, A. P. L.; DE CAMPOS T. M. P.; ROCHA FO, P.; VARGAS JR. E. A. (2005). Avaliação dos fatores de segurança e mecanismos de ruptura através de soluções analíticas. *In:* V Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, ABMS, São Paulo. p. 531-540

FONTOURA, S. A. B. *et al.* (1984). A reanalysis of some slides in gneissic residual soils. Int. Symp. On Lindslides, Toronto.

FOURIE, A. B.; ROWE, D.; BLIGHT, G. E. (1999). The effect of infiltration on the stability of slopes of dry ash dump. Geotechnique, vol. 49 (n. 1), p. 1-13.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. S. (1978). The shear strength of unsaturated soils. J. Geot. Div. A. S. C. E., v. 103, Gt5, p. 447-466.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LACERDA, W. A. (2005). Evolução de uma voçoroca por escorregamentos retrogressivos em solo não-saturado. *In:* V Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, ABMS, São Paulo. v. 1, p. 443-452.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. (1976). Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamento em meio tropical úmido. São Paulo: IPT. 48 p. (IPT pub. 1080).

JESUS, A. C. (2008). Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), EESC-USP, São Carlos.

MATOS, M. M. (1974). Stability of slopes in residual soils. 1974. 220 f. Master Thesis (Department of Civil Engineering), University of Alberta, Canadá.

MATSUSHI, Y.; HATTANJI, T.; MATSUKURA, Y. (2006). Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. Geomorphology, vol. 76, p. 92-107.

MUTOHAR, A. S.; LIAO, H. (2010). Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm. Nat. Harzards. Vol. 54, p. 967–984

NG, C. W. W.; SHI, Q. (1998) Influence on rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils. Quartely Journal of Engineering Geology, vol. 31, p. 105-113.

PRESA, E. P.; SILVA, J. C. F. (1978). Escorregamentos do Maciço do Julião. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE), São Paulo. p. 165-1984.

RAHARDJO, H.; LIM, T.T.; CHANG, M. F.; Fredlund, D. G. (1995). Shear strength characteristics of a residual soil. Can. Geotech. J. vol. 32, p. 60-77.

RAHARDJO, H.; ONG, T.H.; REZAUR, R. B.; LEONG, E. C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering, p. 1532-1543.

RAHARDJO, H.; LI, X.W.; TOLL, D. G.; LEONG, E. C. (2001). The effect of antecedent rainfall on slope stability. Geotechnical and Geological Engineering, vol. 19, p. 371-399.

ROCHA FO, P. (1973). Estudo do escorregamento do Catingueiro-Barra do Piraí-RJ. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROCHA, J. C. S.; ANTUNES, F. S; ANDRADE, M. H. (1992). Características geológica-geotécnica dos materiais envolvidos nos escorregamentos da Vista Chinesa. *In*: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, vol. 1, Rio de Janeiro, p. 491-502.

SILVA, D.D.; Valverde, A. E. L.; PRUSKI, F. F.; GONÇALVES, R. A. B. (1999). Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação intensidade-duração-frequência da precipitação para o estado de São Paulo. Revista Engenharia na Agricultura, v. 7, n. 2, p. 70-87.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. (1987). Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (CBGE), v. 2, p. 225-236.

TERZAGHI, K. (1950). Mechanism of landslides. *In:* Application of Geology to Engineering Practice, Geological Society of America, Berkey, p.83-123.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the water permeability of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v. 44, p. 892-898.

VAUGHAN, P. R. (1985). Pore pressures due to infiltration into partly saturated slopes. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, Brasília. v. 2, p. 61-71.

WOLLE, C. M. (1988). Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

WOLLE, C. M. (1980). Taludes naturais – Mecanismos de instabilização e critérios de segurança. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ZHANG, L. L.; FREDLUND, D. G.; ZHANG, L. M.; TANG, W. H. (2004). Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained. Canadian Geotechnical Journal, v. 41, p. 569-582.

Capítulo 25
Efeito da infiltração na elevação de nível freático nas encostas

Marcos Massao Futai

1 Introdução

Além dos escorregamentos que ocorrem sob condição não saturada, apresentados no Capítulo 24, também há escorregamentos que ocorrem por elevação do nível freático nas encostas que apresentam nível freático permanente ou sazonal. Nesses casos, o conhecimento da relação entre a infiltração e a variação do nível freático nas encostas é fundamental para entender-se como ocorre a instabilização das encostas.

As precipitações prolongadas e, consequentemente, prolongado tempo de infiltração podem gerar situações de saturação ou elevação do nível freático de forma generalizada em regiões serranas. A consequência pode ser catastrófica. Neste capítulo, é apresentada uma sistematização para caracterizar os escorregamentos desenvolvidos para escorregamento na Itália, quando ocorrem os chamados desastres naturais decorrentes de deslizamentos, cujo fenômeno é similar aos observados no Brasil.

Normalmente a infiltração nas encostas é atribuída às chuvas, mas, no caso das áreas de ocupação irregular, também há contribuição das águas residuárias que são fonte contínua de infiltração. Em alguns casos, a ruptura de tubulações de rede de água, esgoto ou pluvial pode causar deslizamentos. Quando o agente preparatório para instabilização provém das águas residuárias, há como quantificá-la.

2 Escorregamentos causados por infiltração que geraram pressão de água positiva

Alguns casos de escorregamento ocorrem com formação de rede de fluxo, ou seja, há elevação de pressões de água positiva nos poros do solo devido à infiltração da água da chuva. Porém, esse nível freático pode ser perene; nos períodos de estiagem, o solo permanece não saturado. O perfil geotécnico desses casos, em geral, é semelhante. São solos coluvionares ou residuais sobrepostos à rocha impermeável (ou solo residual com permeabilidade muito menor que a do solo superficial), cujo nível freático se eleva a partir do contato solo-rocha (ou solo menos permeável). Os escorregamentos também ocorrem no contato solo-rocha. Os casos selecionados para exemplificar esse mecanismo são os escorregamentos de:

- Santos: Monte Serrat e Morro da Caneleira (VARGAS, 1999);
- Cactáreo-RJ (ANDRADE *et al*., 1992) ;
- Lagoa-RJ (GERSCOVICH *et al*., 2011);
- São Mateus-SP (FRANCH e FUTAI, 2009), este com características distintas dos demais.

Além desses casos documentados, também é possível especular que muitos escorregamentos que ocorreram nos desastres na Serra do Mar, em 1966, 1967 (SP e RJ), 2008 (SC) e 2011 (RJ), tiveram mecanismos deflagradores similares. Um resumo das características desses solos e dos escorregamentos está apresentado na Tabela 1. Cada um deles está apresentado separadamente a seguir.

Tabela 1. Casos da literatura de escorregamentos causados por pressão de água positiva.

Local	Referência	Características do solo	Talude e Escorregamento
Monte Serrat Santos	Vargas (1999)	Solo residual sobreposto à rocha impermeável. Umidade natural c = 40kPa, $\varphi = 42^o$ Inundado c' = 20kPa, $\varphi' = 38^o$	Escorregamento circular profundo, inclinação 40º r_u entre 0,2 e 0,3
Morro da Caneleira	Vargas (1999)	Solo residual sobreposto à rocha impermeável. Inundado c' = 30kPa, $\varphi' = 41^o$	Nível freático não detectado no período de estiagem, inclinação 42º Escorregamento translacional. $r_u = 0,3$
Morro do Cactáreo	Andrade *et al.* (1992)	Solo coluvionar de 1,5m a 2m de espessura. Geologia formada por gnaisse facoidal, Umidade natural c=4,3kPa, $\varphi=32^o$; Inundado c' = 19,6kPa, $\varphi' = 35^o$	60m de altura, inclinação entre 30º a 40º. Escorregamento translacional no contato solo-rocha.
Encosta da Lagoa-RJ	Gerscovich *et al.* (2011)	Solo residual de até 15m de espessura c'=0kPa, $\varphi'=34,7^o$ e $\varphi^b=25^o$	Escorregamento profundo, pressão de água nas fraturas. Inclinação média de 30º.
São Mateus-SP	Franch e Futai (2009)	Aterro argiloso sobre solo residual siltoso. Aterro: c'=15kPa, $\varphi'=31^o$ e $\varphi^b=36^o$ Solo residual: c'=5kPa, $\varphi'=25^o$ e $\varphi^b=11^o$	Nível freático profundo Inclinação média de 36º. Pressão de água positiva sobre um solo residual não saturado.

2.1 Escorregamento do Morro da Caneleira-Santos-SP

Em março de 1956, uma série de eventos catastróficos ocorreu ao redor da cidade de Santos. No dia primeiro do mês, depois de uma chuva de 129 mm/dia, ocorreram vários escorregamentos no Morro Santa Tereza (RJ), tendo como resultado 21 mortes, 42 feridos e mais de 50 casas destruídas (VARGAS, 1999). Nesse mesmo ano, ocorreu um escorregamento translacional no Morro da Caneleira (Santos-SP), o qual foi descrito por Vargas e Pichler (1957). A encosta tinha inclinação média de 42º, a espessura da massa escorregada tinha cerca de 7 m de espessura e 100 m de extensão (Figura 1). O escorregamento ocorreu no final do verão, com o solo razoavelmente saturado, sob a ação de fortes chuvas que atingiram o local cerca de 250 mm e se estabeleceu uma rede de fluxo paralela ao talude. A foto do escorregamento está apresentada na Figura 2.

O material envolvido era um solo residual com espessura em torno de 7 m em contato com a rocha impermeável. Não houve investigação detalhada, muito menos se usaram conceitos de solos não saturados, pois, naquela época, essa teoria ainda na havia se difundido. Porém, pode-se especular que havia contribuição da sucção para que a encosta fosse estável em virtude da elevada inclinação da encosta. Vargas (1999) relatou que sondagens realizadas após o escorregamento não registraram nível d'água, o que confirma que a encosta permanece não saturada quando está estável. Vários pesquisadores calcularam a estabilidade do Morro da Caneleira e todos concluíram que só uma pressão de água positiva poderia ter causado o escorregamento.

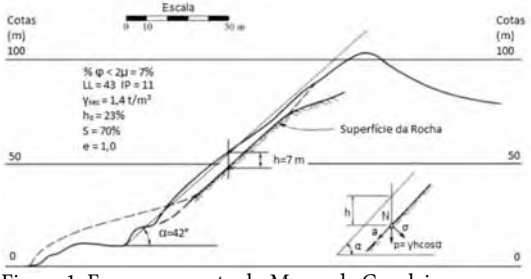


Figura 1. Escorregamento do Morro da Caneleira (VARGAS, 1999)

Figura 2. Foto do escorregamento do Morro da Caneleira (http://www.novomilenio.inf.br).

2.2 Escorregamento do Monte Serrat-Santos-SP

Outro caso com características semelhantes foi o escorregamento do Monte Serrat (Figura 3). Nesse local, ocorreram dois escorregamentos conhecidos: um em 1928 e outro em 1956, causados pelos mesmos motivos do escorregamento no Morro da Caneleira. Entretanto, o escorregamento no Monte Serrat foi mais profundo e próximo a uma configuração circular, conforme está mostrado na Figura 4. Vários autores também retroanalisaram o caso e, por isso, há uma variação do r_u em função dos parâmetros adotados ou do método de cálculo. Porém, todos concluíram que só um valor de pressão de água positiva justificaria o escorregamento. Apesar de históricos, os casos de Monte Serrat e Caneleira não tinham monitoramento de piezometria para confirmar a oscilação do nível freático.

Figura 3. Foto do escorregamento do Monte Serrat (http://www.blogcaicara.ccom.br).

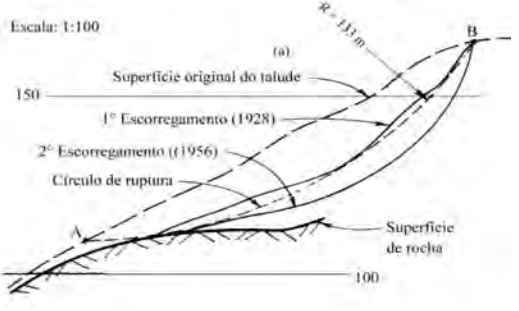


Figura 4. Escorregamento do Monte Serrat (VARGAS, 1999).

2.3 Escorregamento da Encosta do Cactáreo-RJ

O mecanismo de elevação do nível freático em uma encosta estável e não saturada no período de estiagem foi confirmada por Andrade *et al.* (1992) quando estudaram o escorregamento na Encosta do Cactáreo (Maciço da Tijuca-RJ). A seção geotécnica, indicada na Figura 5, é composta por uma camada superficial coluvionar; a geologia é formada por Gnaisse Facoidal muito fraturado no contato solo rocha. Andrade *et al.* (1992) monitoraram a piezometria da encosta do Cactáreo por quatro anos. O resultado pode ser visto na Figura 6, juntamente com os dados de pluviometria.

Analisando a Figura 6, pode-se constatar que os piezômetros ficam secos em boa parte do ano e há uma boa correspondência com os períodos de estiagem.

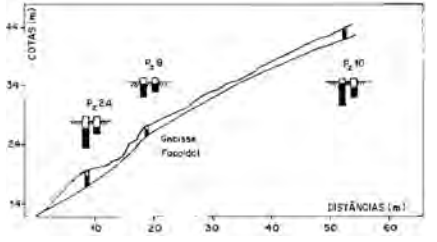


Figura 5. Perfil longitudinal da encosta do Cactáreo (ANDRADE et al., 1992).

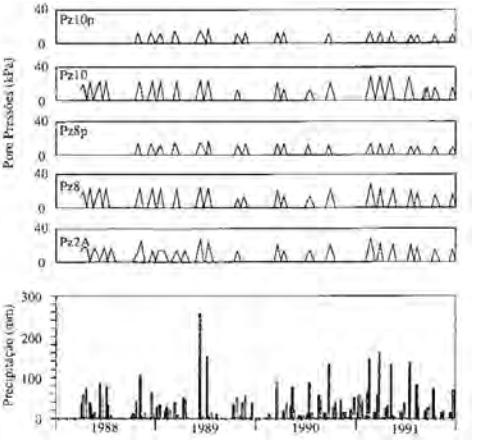


Figura 6. Registros pluviométricos e piezométricos da encosta do Cactáreo (ANDRADE et al., 1992).

A encosta permanece em condições não saturadas parte do ano e, nos períodos de precipitação prolongada, é gerada uma rede de fluxo. Andrade *et al.* (1992) afirmaram que a condição de sucção da encosta é importante para estudar o fluxo não saturado. Portanto, mesmo se tratando de um caso de estabilidade governada por aumento de pressão de água positiva nos poros, o processo de infiltração superficial se dá em meio não saturado.

As análises de fluxo indicaram que é preciso haver uma fronteira impermeável para elevação do nível freático. As análises de estabilidade demostraram que a encosta é estável em condições de sucção nula e é preciso que ocorram valores de pressão positiva para justificar o escorregamento.

2.4 Escorregamento da Lagoa-RJ

Outro caso de escorregamento que ocorreu devido à pressão de água positiva, que ainda necessitou de estudos de infiltração em condições não saturada, foi relatado por Gerscovich *et al.* (2011). Em fevereiro de 1988, aconteceram vários escorregamentos na cidade do Rio de Janeiro.

A pluviometria acumulada dos 21 dias antecedentes foi de 515,6 mm com o pico de 85,4 mm num dia. Nove meses depois, ocorreu um deslizamento na encosta da Lagoa-RJ em área

revegetada. A foto do escorregamento está mostrada na Figura 7, depois de um período de intensidades médias de chuva, com valor acumulado em 21 dias de 246,3 mm e pico em um dia de 57,5 mm.

A crista do talude estava a uma elevação de 384 m e a inclinação entre 30˚ e 55˚. No pé do talude, havia um muro de gravidade alinhado a uma parede que pertencia ao edifício. A Figura 8 mostra uma representação da seção central do talude.

Figura 7. Foto do escorregamento da Lagoa-RJ (GERSCOVICH *et al.*, 2011).

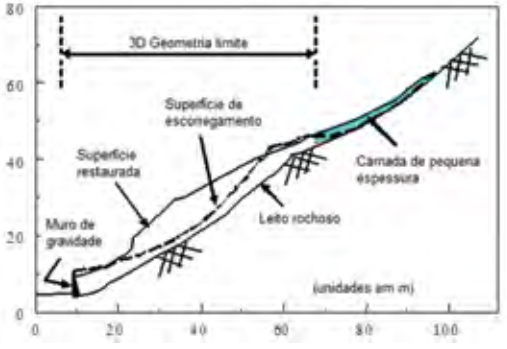


Figura 8. Seção central do escorregamento da Lagoa-RJ (GERSCOVICH *et al.*, 2011).

Considerando a profundidade média da massa do deslizamento de aproximadamente 5 m, condição totalmente drenada, porosidade inicial de 0,38 e umidade volumétrica 0,1, a saturação completa do perfil exigiria pelo menos 1400 mm de infiltração de água para a ocorrência do movimento de massa. A retroanálise do escorregamento realizada por Gerscovich *et al.* (2011) revelou um fator de segurança maior que 3,5 independente do método de estabilidade utilizado e da superfície de ruptura. Esse resultado indicou que a chuva acumulada que atingiu a superfície do talude não era suficiente para deflagrar o escorregamento.

A simulação de um fluxo preferencial através da região fraturada entre o solo residual e a rocha, além das chuvas, resultou em uma condição favorável para atingir o padrão hidrológico observado em campo, conforme está mostrado na Figura 9. De fato, a análise de estabilidade mostrou que essa alternativa pode ser usada para identificar os principais mecanismos de desencadeamento do deslizamento (GERSCOVICH *et al.*, 2011).

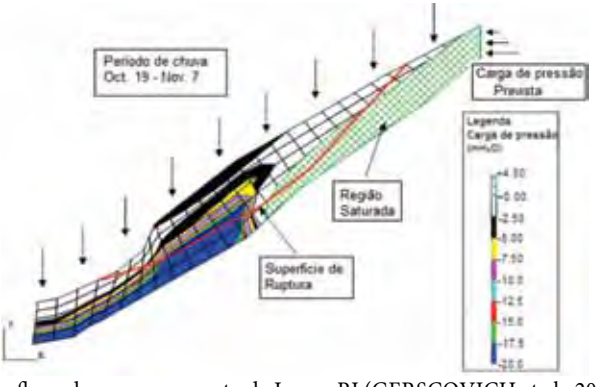


Figura 9. Análise de fluxo do escorregamento da Lagoa-RJ (GERSCOVICH et al., 2011).

2.5 Escorregamento em São Mateus-SP

Franch (2008) e Franch e Futai (2009) apresentaram um caso de escorregamento, cujo mecanismo se deu com geração de pressão de água positiva. Nesse caso, entretanto, só o estudo detalhado da condição não saturada conseguiu explicar o mecanismo de instabilização.

Em 2005, ocorreu um escorregamento em um aterro argiloso em um talude em São Mateus, zona Leste de São Paulo. Ao lado do escorregamento, numa área que não escorregou, foi implementada uma área experimental, na qual foram coletadas amostras e instalada uma rede de tensiômetros. As duas áreas têm seção geotécnica distinta: (a) na área estudada há uma camada de aterro que cobre a porção central e a crista do talude e (b) no talude que rompeu o aterro se estendia até o pé.

A seção geotécnica com a posição dos tensiômetros e o nível freático medido no pé do talude estão mostrados na Figura 10. O nível freático se encontra a 4 m abaixo do pé do talude. O solo abaixo da camada de aterro é um solo residual de gnaisse com textura siltosa. Entre a camada de aterro e o solo residual há uma camada delgada de detritos vegetais, que é um indício de que o aterro foi lançado sem controle. Ensaios de caracterização, permeabilidade, curva de retenção, resistência saturada e não saturada foram realizados para estudar o comportamento do solo e obter parâmetros para realizar análises de fluxo e de estabilidade. A partir dos resultados do monitoramento, Franch e Futai (2009) idealizaram a distribuição da pressão de água nos poros em diferentes períodos do ano. Na Figura 11, estão indicados esses valores para os meses de fevereiro (Figura 11-a) e agosto (Figura 11-b) de 2005. Pode-se observar que, no período de estiagem, as pressão de água são negativas em todo o talude com máximo valor de sucção medido de 60kPa (Figura 11-b). No período mais chuvoso, as pressões de água se elevam, inclusive com valores positivos (Figura 11-a). Porém, o solo residual se mantém não saturado (valores de pressão de água negativos). Esse mecanismo é distinto dos demais até agora apresentados neste capítulo.

O valor de entrada de ar do aterro é elevado (150kPa) e do solo residual é baixo (4kPa). Por isso, há um contraste entre a função de condutividade hidráulica do solo argiloso e do solo residual.

A permeabilidade saturada do aterro ($2x10^{-7}$ cm/s) é muito menor que a do solo residual ($2x10^{-4}$ cm/s). Porém, o efeito da sucção causa uma diferença entre a permeabilidade do aterro (quase sempre saturado) e a do solo residual (quase sempre não saturado), de modo que o

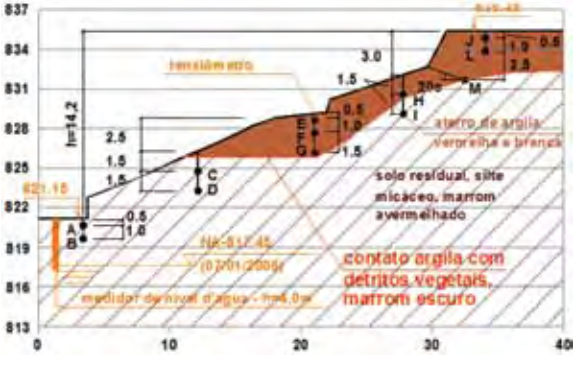


Figura 10. Secção geotécnica do talude de São Mateus-SP (FRANCH e FUTAI, 2009).

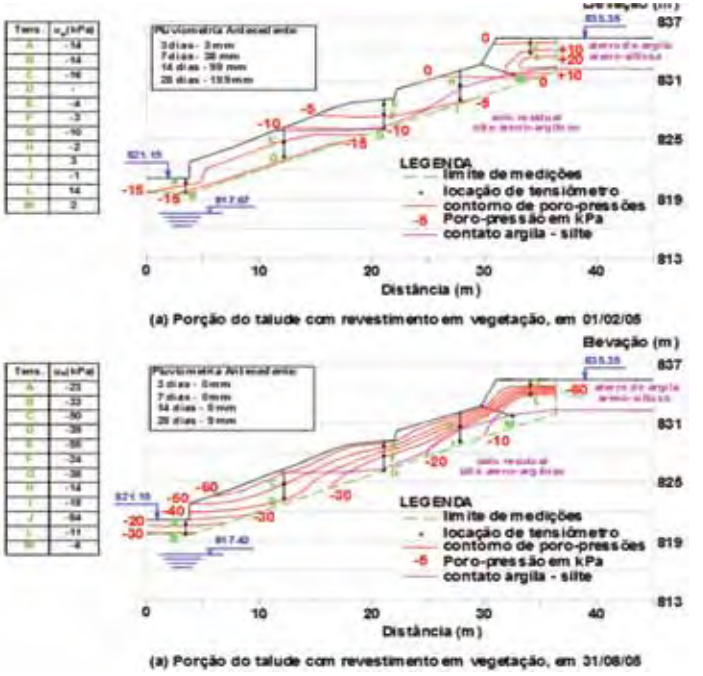


Figura 11. Distribuição da pressão de água nos poros em (a) fevereiro e agosto de 2005 (FRANCH e FUTAI, 2009).

solo residual pode ter permeabilidades menores que as do aterro na condição não saturada. Isso justifica os valores de pressão de água positivos. No talude experimental, esse valor não é suficiente para causar escorregamento, pois se desenvolve em uma parte do talude, embora pudesse justificar o escorregamento ao lado ocorrido em 2005.

3 Infiltração, escorregamentos e desastres naturais

Os tipos de movimentos de massa que ocorrem durante os desastres são os mais variáveis possíveis. Alguns deles, no entanto, podem ocorrer em condição não saturada ou fluxo saturado gerado após um período de estiagem. Portanto, os mecanismos de escorregamentos que envolvem os solos nas condições não saturadas em casos de grandes desastres associados com deslizamentos são os mesmos discutidos nos dois itens anteriores e no Capitulo 24.

Nesta seção, é feita uma breve revisão do estado da arte focado no conhecimento dos italianos, já que os casos são similares às situações de desastres registrados no Brasil, em 1966 e 1967 (Caraguatatuba, Serra das Araras e Rio de Janeiro), 1985 (Serra de Cubatão), 2011 (Região Serrana do Rio de Janeiro), dentre outros.

Cascini e Sorbino (2003) relataram que, em maio de 1988, num intervalo de 10 horas, ocorreram deslizamentos em quase toda a bacia de Pizzo d'Alvano, região de Campania, na Itália. As áreas de início do movimento estavam localizadas principalmente na parte superior da bacia. A inclinação média dos taludes variou entre 35˚ e 41˚ e a profundidade dos desliza-

mentos de 0,5 m a 5,0 m. As cicatrizes desses escorregamentos podem ser vistas na Figura 12, em que a forma alongada se assemelha às observadas na Serra do Mar.

Movimentos pós-ruptura levaram à formação de corridas, provavelmente pelo fenômeno de liquefação estática. O volume dos escorregamentos foi aumentando devido à incorporação de solos erodidos de voçorocas e, em alguns casos, à incorporação de pequenos escorregamentos. O volume total de massa de solo que deslizou foi de aproximadamente 3 milhões de m^3 e as velocidades estimadas variaram de 1 a 20 m/s. Por meio de ensaios realizados com amostras indeformadas, foram obtidos valores de ângulos de atrito efetivo que variaram de 30˚ a 37˚ e as coesões efetivas foram menores que 5 kPa (CASCINI e SORBINO, 2003).

Cascini e Sorbino (2003) mediram a sucção durante o período de novembro de 1999 a abril de 2002. As medidas de sucção foram realizadas em profundidades inferiores a 2 m. Conforme esperado, a sucção variou sazonalmente, reduzindo com aumento da precipitação; entretanto, não foram registrados valores de pressão positiva de água.

Olivares e Damiano (2007) estudaram a região de Campania na Itália, onde ocorrem muitos escorregamentos em solos piroclásticos. As encostas têm inclinação (α) média variando entre 38˚ e 45˚, semelhantes às encostas brasileiras (Capítulo 24).

Em relação ao processo de instabilidade que atingem essas áreas, Olivares e Damiano (2007) identificaram dois cenários que podem ser reconhecidos de acordo com a morfologia do talude:

- Caso (1) – encosta íngreme, ângulo de inclinação próximo ou ligeiramente maior que o ângulo de atrito: o ponto representativo do estado de tensões no início da instabilidade é próximo à envoltória de resistência para material saturado (Figura 13-a);
- Caso (2) – encosta muito íngreme, ângulo de inclinação significativamente maior que o ângulo de atrito: o ponto que representa o estado de tensões no início da instabilidade está localizado bem acima da envoltória de resistência ao cisalhamento do material saturado (Figura 13-b).

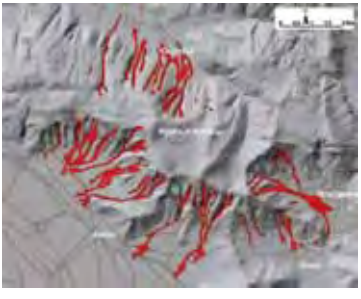


Figura 12. Planta dos deslizamentos ocorridos em 1998 na Itália (CASCINI e SORBINO, 2003).

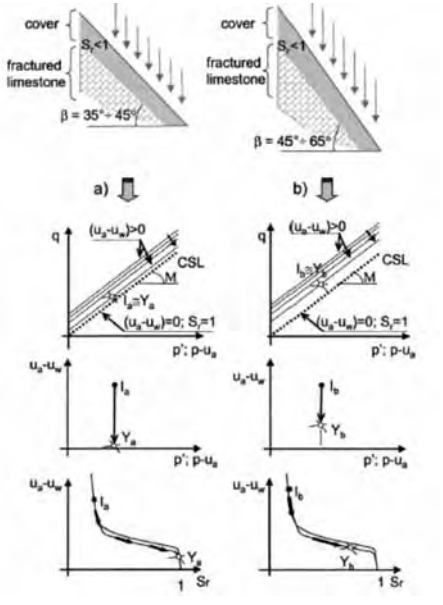


Figura 13. Estado de tensões induzidos por precipitação em (a) encostas íngremes e (b) encostas muito íngremes (OLIVARES e DAMIANO, 2007).

Essas duas situações foram associadas com as trajetórias de tensões no diagrama p:q e com a trajetória de umedecimento na curva de retenção, conforme ilustrado na Figura 13.

Em situações de chuvas extremas podem ocorrer movimentos de massa pós-escorregamentos. Existem dois cenários possíveis de instabilização que podem se desenvolver em solos inicialmente não saturados. No Caso 1 (taludes íngremes), é mais provável a evolução de pós-escorregamento para um fluxo saturado, como deslizamento de terra.

De fato, com um declive suave, a ocorrência de corrida pode estar relacionada a um desenvolvimento de pressões positivas se as seguintes condições forem satisfeitas: suscetibilidade do solo à liquefação estática; estabelecimento de uma condição totalmente saturada no início da instabilidade, e taxa de dissipação lenta de pressão de água nos poros, em comparação com a taxa de movimentação.

A Figura 14-a mostra o escorregamento em Cervinara e é um exemplo do caso de talude íngreme. A inclinação da encosta é da ordem de 40˚ e o ângulo de atrito do solo um pouco menor que 40˚. Ocorreu o fenômeno de liquefação com profundidade da ordem de 1,5 m.

A Figura 14-b é do Monte Spina, cujo talude é muito íngreme. O escorregamento foi raso com espessura média de 1,2 m envolvendo cobertura piroclástica com declive de 48˚ e ângulo de atrito de 35˚.

No caso de Cervinara, Olivares e Damiano (2007) descreveram que a ruptura ocorreu em condições de saturação quase total, quando a inclinação era próxima do ângulo de atrito. A redução da sucção próxima à saturação reduz a resistência; ao mesmo tempo, são geradas tensões de cisalhamento sob condições parciais ou totalmente não drenadas. Se a trajetória de tensão gerada atingir a envoltória de resistência (Figura 14-a), ocorrerá o deslizamento. No caso de Cervinara, o movimento pós-escoamento nos depósitos liquefeitos causou uma corrida.

No caso do Monte Spina, em que a inclinação é muito maior que o ângulo de atrito, a ruptura ocorreu quando o solo ainda apresentava sucção e, portanto, com grau de saturação significativamente menor que a unidade (OLIVARES e DAMIANO, 2007). Para racionalizar o problema, foi proposto o fluxograma da Figura 15, que resume as possibilidades de resposta de um talude infinito de solo granular exposto à água.

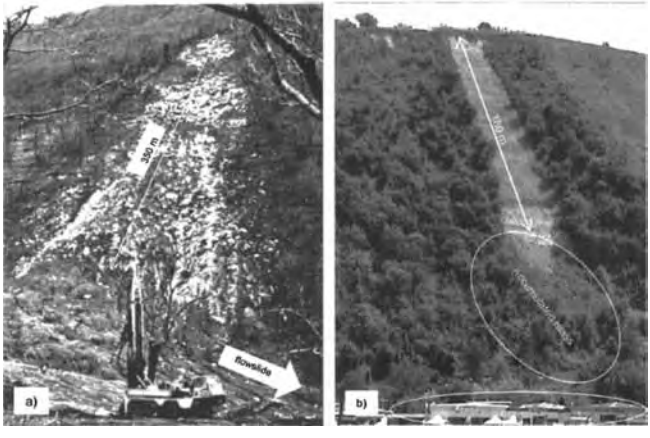


Figura 14. Fotos dos escorregamentos em (a) Cervinara e (b) Monte Spina (OLIVARES e DAMIANO, 2007).

Solos piroclásticos raramente são saturados, mesmo em encostas suaves. Nesse caso, se a infiltração de água provoca saturação, um aumento na pressão de água poros (positiva) é necessário para desencadear a instabilidade de taludes.

Em ambos os casos (encostas íngremes e encostas muito íngremes), a infiltração de água provoca uma diminuição da sucção e, consequentemente, uma diminuição na resistência ao cisalhamento.

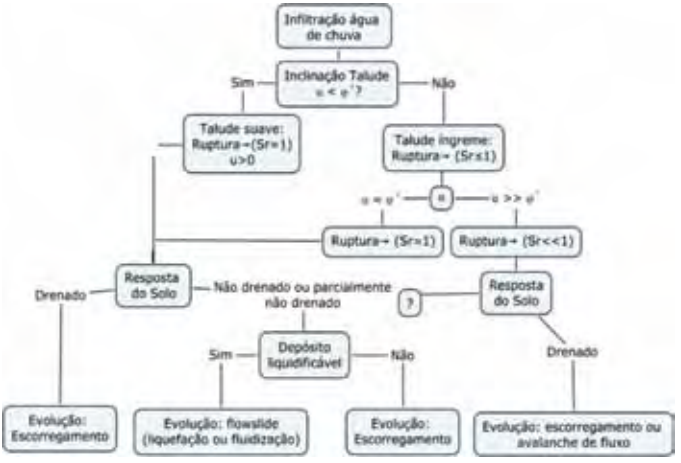


Figura 15. Condições para que a chuva cause escorregamento com liquefação do solo (OLIVARES e DAMIANO, 2007).

Olivares e Damiano (2007) organizaram os casos de escorregamento em função da inclinação das encostas.

Assim, apenas nos casos de encostas íngremes (Figura 16), em que os escorregamentos ocorrem em condições de saturação quase total, o estabelecimento de um mecanismo pós-ruptura não drenado ou parcialmente não drenado promove um mecanismo de liquefação estática. Nas encostas muito íngremes (Figura 16), a ruptura ocorre longe da saturação, e uma evolução pós-ruptura em corrida não é garantido. Nesse caso, a maior parte das encostas que escorregaram tinham inclinação próxima ao ângulo de atrito do solo.

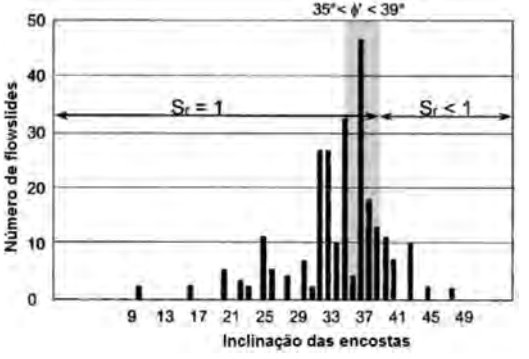


Figura 16. Inclinação da encosta e ocorrência de deslizamento em Quindichci, Itália, em 1998 (OLIVARES e DAMIANO, 2007).

O estudo de Olivares e Damiano (2007) para os solos piroclásticos chegou a conclusões bem fundamentadas sobre as corridas no movimento pós-escorregamento. No artigo dos referidos autores, sugere-se que se tente aplicar essas mesmas metodologias para as situações de desastres causadas por deslizamentos em condições de chuvas extremas.

Os casos da Serra do Mar investigados por Wolle (1988) apresentam condições, segundo os estudos de Olivares e Damiano (2007), para que o escorregamento saturado evoluísse para uma corrida. Essa catástrofe ocorreu em 1985 (WOLLE, 1988), no Vale do Rio Moji, onde ocorreram mais de 1000 cicatrizes.

Também se poderia extrapolar a aplicação do mecanismo proposto por Olivares e Damiano (2007) para os dois casos de Santos (VARGAS, 1999), pois os valores dos ângulos atrito e da inclinação das encostas são próximos. Porém, o mecanismo é distinto, porque no caso de Santos há formação de uma rede de fluxo saturada.

As ocorrências de desastres no Brasil estão concentrados na Serra do Mar, cuja característica geológica pode definir o mecanismo de instabilização. Nos casos em que há permeabilidades crescentes com a profundidade, os escorregamentos podem ocorrer na condição não saturada ou no máximo com anulação da sucção (Serra do Mar no trecho paulista). No caso em que a rocha é impermeável ou mesmo permeável, pode-se formar um nível freático e o escorregamento está associado à elevação desse nível, conforme identificado por Vargas (1999) e Andrade *et al.* (1992). Se fosse suficientemente íngreme, uma encosta poderia escorregar em condições não saturadas, mesmo sendo rocha impermeável.

O mecanismo proposto por Wolle (1988) é um escorregamento translacional em solo coluvionar superficial com o substrato inferior e com o solo residual. No caso de Santos e do Rio de Janeiro, o escorregamento ocorre no contato solo-rocha. Conforme mostrado no Capítulo 23, Matsushi *et al.* (2006) apresentaram dois casos que se assemelham às duas condições encontradas na Serra do Mar.

Os casos de desastres naturais misturam vários tipos de deslizamentos; por isso, não é possível generalizar os mecanismos. Porém, é possível dizer que alguns escorregamentos e fontes de materiais que geram as corridas de lama ou mesmo os *debris flow* são provocados pela infiltração em condições especiais. Edegers e Nadim (2004) realizaram estudos numéricos de filtração unidimensional sob condições de chuvas prolongadas. Usaram um solo com umidade volumétrica saturada de 45%, condutividade hidráulica saturada de $4{,}8 \times 10^{-7}$ m/s e mantiveram o nível d'água fixo a 10 m de profundidade. Edgers e Nadim (2004) fizeram duas simulações de infiltração, uma com intensidade igual à permeabilidade saturada (k_{sat}) e outra com 0,2 k_{sat} . Os resultados dos perfis da pressão de água ao longo do tempo estão apresentados nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Após 86 dias de infiltração constante, houve redução da pressão de água para zero no caso em que a infiltração foi igual à condutividade hidráulica saturada (Figura 17). A sucção mínima ficou constante com a profundidade e igual a 19 kPa no caso em que a intensidade de chuva foi simulada com 0,2 da condutividade hidráulica saturada (Figura 18). Nessas duas situações, as condições de contorno usadas na simulação não permitem que haja elevação do nível freático, o que nem sempre é real. Para verificar a geração de pressão de água positiva em uma camada superficial, Edgers e Nadim (2004) simularam a existência de uma camada com permeabilidade menor a 5 m de profundidade e provaram que essa possibilidade existe.

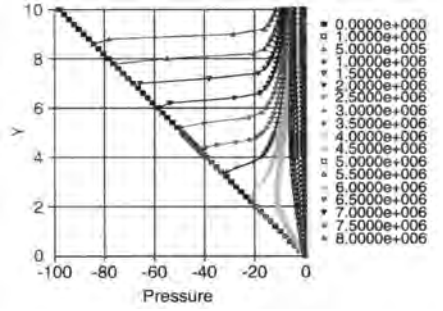


Figura 17. Perfil da pressão de água para q=ksat ao longo do tempo (EDGERS e NADIM, 2004).

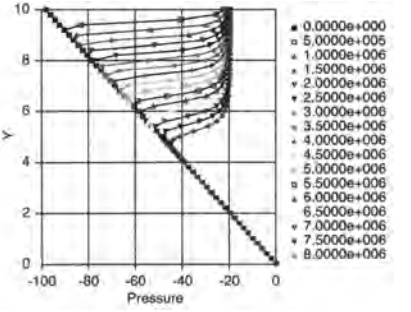


Figura 18. Perfil da pressão de água para q=0,2 ksat ao longo do tempo (EDGERS e NADIM, 2004).

A partir dessa informação, eles passaram a fazer um estudo de caso de *debris flows* que ocorrem na Noruega. As encostas são cobertas por solos glaciais ou coluvionares de pequena espessura (0,5 m a 1 m) com elevada permeabilidade por causa de raízes, penetração de gelo e ação de organismos. Abaixo desse solo superficial, há um solo com permeabilidade relativamente menor. Os *debris flow* são provocados por chuvas pesadas associadas com neve. Na Figura 19, está apresentado um exemplo de dados pluviométricos do mês de agosto de 1975. O *debris flow* ocorreu no dia 19 na Noruega, após 16h de chuva, sendo 14h de chuva de baixa intensidade seguida de 4h de chuva intensa. A simulação desse caso foi feita com permeabilidade saturada de 10^{-7} m/s para a camada superior; para a camada inferior, foi adotada permeabilidade com 4, ordem de grandeza menor que a anterior. O resultado dessa análise está mostrado na Figura 20. A mudança da pressão de água negativa para positiva é muito rápida (Figura 20), praticamente a variação da coluna de água positiva se forma instantaneamente após a anulação da sucção. O tempo necessário previsto pela simulação para que ocorresse uma mudança brusca foi de 13,9h, bem próximo ao tempo observado em 1975 (Figura 19).

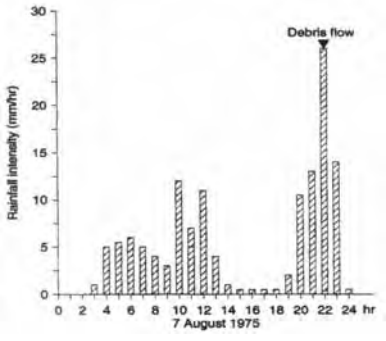


Figura 19 – Dados pluviométricos que causaram *debris flow* na Noruega (EDGERS e NADIM, 2004).

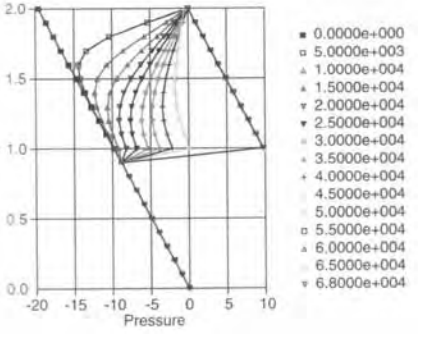


Figura 20. Perfil da pressão de água ao longo do tempo para o caso do *debris flow* na Noruega (EDGERS e NADIM, 2004).

O caso analisado por Edgers e Nadim (2004) também poderia ocorrer nas encostas brasileiras, tais como os casos citados neste capítulo. Ainda não houve casos em que se pode confirmar essa hipótese, porque seria necessária uma instrumentação automática e de longo prazo. Essa elevação instantânea como uma "bomba d'água" só deve ocorrer em condições

especiais de encostas não saturadas sujeitas a longos períodos de chuva, mas podem explicar vários escorregamentos e mesmos *debris flows*, tais como os que ocorrem em parte da Serra do Mar (sul do Brasil e no Rio de Janeiro).

4 Infiltração decorrente de ação antrópica

A ocupação das encostas promove uma série de alterações na geometria do talude (cortes e aterros), desmatamento, construções irregulares, plantios descontrolados, canalizações de água, lançamento de águas servidas, etc. Dentre os itens citados, as canalizações de água e as águas residuárias podem contribuir para infiltração de água nas encostas.

Muitos escorregamentos são atribuídos a rupturas de tubulações de água, podendo ou não ser especulativos. Alguns casos em que havia suspeita de que poderia haver uma contribuição além das chuvas, os quais foram investigados com mais profundidade, são os seguintes:

- Alto do Bom Viver, Salvador-Ba (SANTOS e ASSUNÇÃO, 2005; JESUS, 2008);
- Alto do Reservatório, Recife-PE (GUSMÃO FILHO *et al.*, 1997; FERREIRA e LIMA, 2005);
- Bairro Jardim Califórnia, Nova Friburgo-RJ (DE CAMPOS *et al.*, 2005);
- Escorregamento da encosta do Túnel Rebouças-RJ (FEIJÓ *et al.*, 2009).

4.1 Escorregamento no Alto do Bom Viver

O escorregamento no Alto do Bom Viver foi citado no Capítulo 24, porque deve ter ocorrido sob condição não saturada. Jesus (2008) realizou análises de fluxo com dois cenários: um com infiltração de chuva associado com infiltração antrópica e outro considerando um fluxo adicional representando a ruptura de uma tubulação. A análise de fluxo realizada por Jesus (2008) usou como simplificação um perfil de sucção inicial idealizado como sendo igual a 50 kPa, infiltração constante antes do evento deflagrador de 360h (com intensidade de $8{,}2 \times 10^{-8}$ m/s) e uma chuva principal diferente para cada cenário: sem vazamento foi usada intensidade de $3{,}8 \times 10^{-5}$ m/s com duração de 0,6h e com vazamento foi usada intensidade de $1{,}31 \times 10^{-5}$ m/s com duração de 144h. Não fica claro na dissertação como se chegou a esses valores. Conforme discutido nos itens anteriores, os resultados poderiam variar bastante porque a distribuição de sucção depende das interações entre o solo e as condições ambientais ao longo do tempo pretérito. De qualquer forma, Jesus (2008) chegou à conclusão de que só usando um cenário com vazamento de água se justificaria o escorregamento ocorrido em 1992 no Alto do Bom Viver. Nessa mesma área ocupada, Santos e Assunção (2005) realizaram um estudo simples, mas inovador sobre a quantificação da contribuição da infiltração das águas residuárias, cuja metodologia está apresentada ao final desta seção.

4.2 Escorregamento na Encosta do Alto do Reservatório, Recife-PE

Em Recife, no local chamado de Alto do Reservatório, na encosta voltada para o Córrego do Boleiro em Nova Descoberta, ocorreu um escorregamento que também foi atribuído ao

vazamento de uma tubulação de água. Na Figura 21, está apresentada uma foto da encosta ocupada e, na Figura 22, está delimitada a área do escorregamento.

O escorregamento ocorreu no dia 29/04/1996 e foi descrito por Gusmão Filho *et al.* (1997) e Ferreira e Silva (2005). O talude é formado por solo da formação Barreiras. A área do escorregamento foi de 35.000 m^2, mobilizando 50.000 m^3 de terra e causando 16 mortes e 1000 desabrigados. As fissuras observadas no talude podem ser vistas na Figura 23. Nesse mês de abril choveu todos os dias e, no dia do escorregamento, a intensidade foi de 144 mm (GUSMÃO FILHO *et al.*, 1997).

Não havia dados de instrumentação, mas foi feita uma completa caracterização geotécnica do solo após o escorregamento. Além de caracterização, também foram realizados ensaios de colapso e cisalhamento direto com amostras saturadas e com medida de sucção.

Ferreira e Lima (2005) relataram vários problemas identificados em visitas ao local: ocupação desordenada, casas construídas em patamares próximos aos taludes quase verticais, acúmulo de lixo, lançamento indiscriminado de águas servidas que escoam próximo aos taludes e infiltram devido à má drenagem, remoção da vegetação primitiva e plantação de vegetação arbórea-arbustiva próximo ao talude. As análises de estabilidade realizadas por Ferreira e Lima (2005) mostraram que o fator de segurança reduz 80% quando a frente de saturação atinge 3 m. Portanto, para que o escorregamento ocorresse, seria necessário que a sucção se anulasse mesmo que superficialmente. É provável que somente a chuva não fosse suficiente para causar essa saturação. Gusmão Filho *et al.* (1997) ressaltaram que foram identificadas fendas em vários locais de características semelhantes, e apenas no encosta Sul do Córrego do Boleiro ocorreu o escorregamento. Os autores coletaram relatos de moradores que viram vazamentos de uma tubulação de água na crista do talude que rompeu, o que poderia justificar o escorregamento nessa área.

Figura 21. Ocupação desordenada na em Nova Descoberta, Recife-PE (FERREIRA e LIMA, 2005).

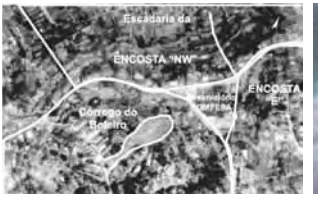


Figura 22. Escorregamento no Alto do Reservatório em Nova Descoberta, Recife-PE (FERREIRA e LIMA, 2005).

Figura 23. Fissuras na encosta do Alto do Reservatório em Nova Descoberta, Recife-PE (FERREIRA e LIMA, 2005).

4.3 Escorregamento em Nova Friburgo-RJ

Na manhã do dia 12/04/2004, ocorreu um escorregamento no Bairro Jardim Califórnia, em Nova Friburgo, que ceifou duas vidas. Esse escorregamento, estudado por De Campos *et al.* (2005), tinha 25 m comprimento e 15 m de largura e ocorreu em duas etapas. Sua foto pode ser vista na Figura 24. O perfil geotécnico é constituído por aterro ou solo maduro na superfície da encosta seguido de solo residual, conforme está mostrado na Figura 25.

O primeiro escorregamento envolveu um talude escavado no pé de 3 m de altura, gerando um escorregamento translacional (1 a 2 m de espessura) na transição do solo residual

maduro ou aterro com o solo saprolítico, totalizando 80 m³ de solo deslizado. Após uma hora, ocorreu o segundo escorregamento na parte inferior da encosta que remobilizou a própria massa escorregada do primeiro escorregamento. De Campos *et al.* (2005) não identificaram a fonte natural de água; constataram, porém, que havia uma tubulação de água rompida na crista do talude que estava vazando água por três dias antes do acidente. Após o acidente, foram realizadas quatro sondagens na área e em nenhuma delas foi encontrado nível d'água. De Campos *et al.* (2005) realizaram simulação numérica da infiltração de água associado com análise de estabilidade e concluíram que só o vazamento da tubulação poderia justificar o escorregamento. Eles também realizaram análise de estabilidade na forma de talude infinito e demostraram que seria necessária uma pressão de água positiva (entre 10 cm a 50 cm) para causar o escorregamento.

Figura 24. Escorregamento em Nova Friburgo (DE CAMPOS *et al*., 2005).

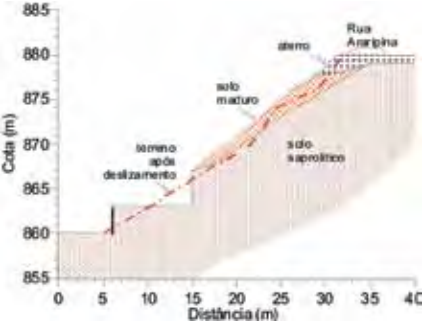


Figura 25. Perfil geotécnico antes do escorregamento (DE CAMPOS *et al*., 2005).

4.4 Escorregamento no Túnel Rebouças, Rio de Janeiro-RJ

O escorregamento na encosta que fica a montante do emboque do túnel Rebouças no Rio de Janeiro ocorreu em 23/10/2007. Provocou o fechamento do túnel e repercutiu muito nos meios de comunicação devido à importância da via para a cidade do Rio de Janeiro. A visão de como ficou o túnel após e escorregamento está apresentada na Figura 26. Feijó *et al.* (2009) descreveram o acidente em detalhes. A encosta tem inclinação que varia entre 35º e 45º. O perfil geotécnico pode ser observado na Figura 27.

Figura 26. Vista do escorregamento no Túnel Rebouças, RJ (FEIJÓ *et al*., 2005).

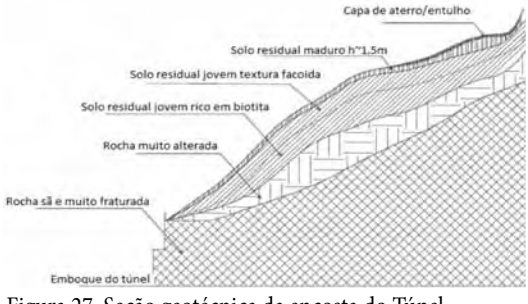

Capa de aterro/entulho
Solo residual maduro h~1,5m
Solo residual jovem textura facoida
Solo residual jovem rico em biotita
Rocha muito alterada
Rocha sã e muito fraturada
Emboque do túnel

Figura 27. Seção geotécnica da encosta do Túnel Rebouças, RJ (FEIJÓ *et al*., 2009).

Feijó *et al.* (2009) identificaram três momentos do movimento de massa:

a) em 23/10/2007, às 16h, ocorreu o primeiro escorregamento de um solo com coloração vermelha a rosa, em volume de 100 m^3, o que ocorreu sem chuva e precipitação acumulada em 24h de 5 mm;
b) às 22h do mesmo dia, chovia 1 mm/h e deslizaram 400 m^3 de solo, razão pela qual as duas galerias do túnel foram fechadas;
c) até a tarde do dia 24, uma chuva de 155 mm em 24h abriu uma clareira de 40 m de extensão e 20 m de largura.

Os dados de precipitações que confirmam essas informações foram compilados na Figura 28. Esse último escorregamento que ocorreu sob uma tempestade causou muita especulação de que a chuva teria promovido o escorregamento. Feijó *et al.* (2009) demostraram, pelo histórico de precipitações que, em outubro de 2007, estavam bem abaixo da média e que as chuvas acumuladas até o dia 23 correspondiam de 15% a 30% das chuvas esperadas para o mês. Essas informações podem ser confirmadas na Figura 29, na qual estão mostrados os dados pluviométricos históricos. Assim, a chuva não poderia ter deflagrado o primeiro e o segundo escorregamento. Essa hipótese foi confirmada por De Campos e Mocada (2008), por meio de análises de estabilidade associadas com análises de infiltração. As análises indicaram que seria necessário um vazamento de água significativo para elevar o nível freático 3 m acima da superfície de deslizamento para causar o acidente.

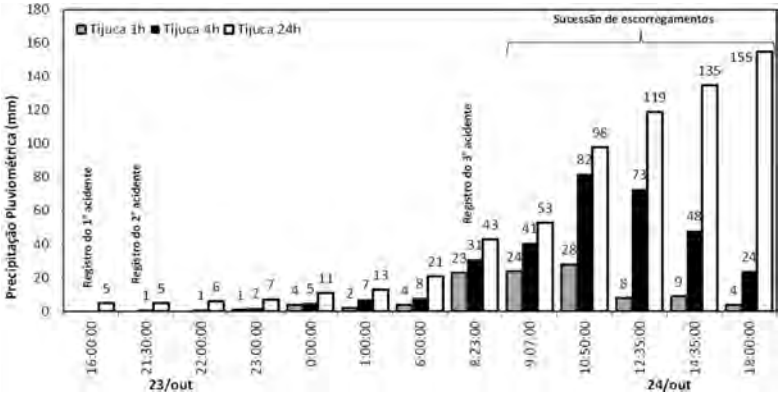


Figura 28. Registro da Estação Tijuca nos dias 23 e 24 de outubro de 2007 (FEIJÓ *et al.*, 2009).

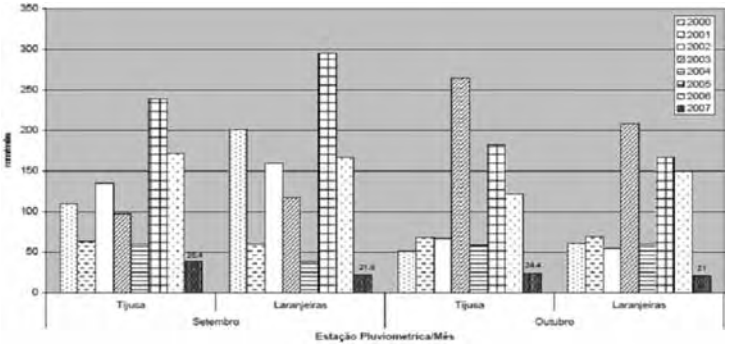


Figura 29. Históricos de precipitações de setembro e outubro (FEIJÓ *et al.*, 2009).

4.5 Metodologia para definir a contribuição da precipitação antrópica

O rompimento de tubulações de água pode ser o agente deflagrador de escorregamento, mas não é uma situação fácil de ser prevista. Pequenos vazamentos podem não deflagrar os escorregamentos, mas podem ser agentes preparatórios, e esses podem ser ainda mais difíceis de serem mensurados.

A infiltração adicional de origem antrópica pode ser um agente preparatório adicional à precipitação ou até mesmo deflagrar um escorregamento. Na Tabela 2, estão resumidos os casos apresentados anteriormente, nos quais houve influência da ação humana para aumentar a infiltração de água na encosta e promover o escorregamento. Os quatro casos são de encostas não saturadas em que escorregamento foi causado pela redução da sucção ou pela geração de uma rede de fluxo. Em condições normais, a sucção mínima seria capaz de manter a estabilidade, mesmo que precária, dessas encostas. Os parâmetros de resistência que governam o comportamento mecânico do maciço são de pico, e a inclinação dos taludes é elevada (maior que 30º).

Tabela 2. Resumo dos casos de escorregamentos induzidos por infiltração antrópica adicional.

Local	Referência	Características do solo	Talude e Escorregamento
Alto Bom Viver, Salvador-Ba	Assunção (2005) e Jesus (2008)	Solo residual de granulito Inundado: c' = 23,7kPa, φ'= 27,1º	Inclinação 40º, altura de 50 m. Nível d'água não detectado nas sondagens. F_{Ssat}=0,94 e F_{Snat}=1,13
Alto do Reservatório, Recife-PE	Gusmão fo *et al.* (1997) , Ferreira e Lima (2005)	Formação barreira Inundado: c' = 7kPa, φ'= 25º ,	35.000 m^2, 50.000 m^3, Inclinação 31º F_{Ssat}≈1 e F_{Snat}=2,2
Nova Friburgo-RJ	De Campos *et al.* (2005)	Solo maduro e aterro k_{sat} = 2 a 6x10^{-6}m/s, Inundado: c'=0, φ'= 30,6º	Inclinação 34º, F_{Ssat}≈1,1; 80 m^3
Túnel Rebouças-RJ	Feijó *et al.* (2009)	Capa de 40 cm de aterro, 1,5 m de solo residual maduro seguido do solo jovem.	Inclinação que varia entre 35º e 45º, nível freático 3 m acima da superfície de deslizamento para instabilizarão.

Nas encostas ocupadas sem controle, as águas residuárias são lançadas no terreno indiscriminadamente. O volume de água diário lançado no meio ambiente depende da taxa demográfica e do consumo *per capita*. Santos e Assunção (2005) estudaram a contribuição das águas residuárias na infiltração do solo e propuseram uma metodologia para quantificá-la. Eles verificaram que o lançamento das águas é distribuído ao longo de toda área, aumentando a capacidade de infiltração e reduzindo a possibilidade de erosão ou inundação. Segundo os autores, as águas residuárias podem evaporar, infiltrar ou escorar de forma pontual, linear ou distribuída.

Após algumas deduções, Santos e Assunção (2005) chegaram a uma expressão por meio da qual é possível calcular o que chamaram de precipitação antrópica, que é dada por:

$$L_{W,PA} = \frac{R \; x \; Pc \; x \; N_{HD}}{N} \qquad (1)$$

onde: $L_{w,PA}$ – Precipitação antrópica; N – número de lotes; R – coeficiente de retorno; Pc – coeficiente de consumo de água per capta (l/hab dia); N_{HD} – número de habitantes por domicílio.

A Figura 30 ilustra o modelo conceitual da distribuição da precipitação antrópica proposta por Assunção (2005).

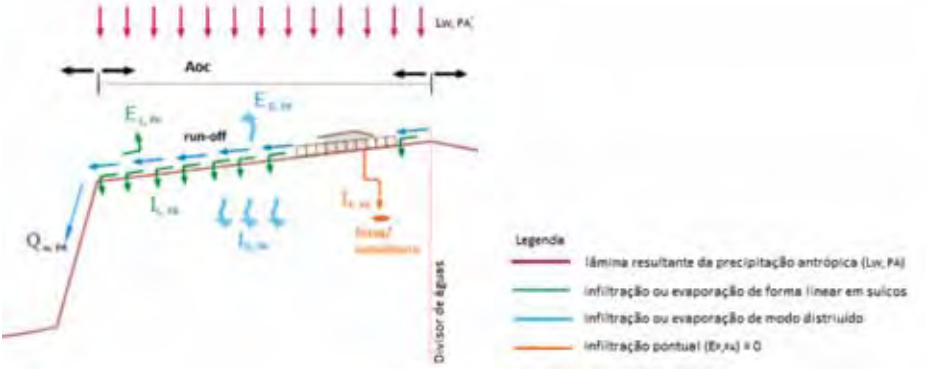

Aoc
run-off
Divisor de águas
Legenda
lâmina resultante da precipitação antrópica (Lw, PA)
infiltração ou evaporação de forma linear em sulcos
infiltração ou evaporação de modo distriuído
infiltração pontual (Ep,ra) = 0

Figura 30. Modelo conceitual de distribuição da precipitação antrópica (ASSUNÇÃO, 2005).

O levantamento de como a água é usada e descartada, realizado por Assunção (2005), para a Encosta do Alto da Boa Vista, definiu a seguinte proporção para o destino das águas residuárias: 40% infiltram; 33% evaporam e 27% escoam.

As águas que escoam superficialmente (*run off*) são descartadas na própria face do talude e se concentram em um ou dois pontos. Assunção (2005) admitiu que a precipitação antrópica ocorre continuamente, sem fazer distinção de horários e períodos do ano. A precipitação antrópica varia em função da taxa de ocupação e do consumo per *capita*; por isso, há uma variação temporal. No caso estudado por Assunção (2005), a precipitação antrópica tem valores entre 68% a 93% da precipitação anual (Tabela 3), ou seja, pode quase dobrar. Nas Figuras 31 e 32, está mostrada a comparação das precipitações mensais (Figura 31) e diária (Figura 32) com a precipitação antrópica.

Os efeitos da infiltração em encostas ocupadas e suas consequências na estabilidade precisam ser avaliados segundo outra ótica. Conforme demostrado por Assunção (2005), apenas 40% da precipitação antrópica infiltra. Portanto, nos meses de déficit hídrico, ele pode ser menor que a taxa de evapotranspiração.

A precipitação antrópica atua como um agente preparatório para escorregamentos que rebaixa o nível de segurança das encostas ocupadas quando comparadas com outra encosta que apresente as mesmas características e não tenha infiltração de parte das águas residuárias. Em outros casos, a ruptura de tubulações de esgoto ou água pluvial pode atuar como agente preparatório (pequenos e contínuos vazamentos) ou mesmo deflagrador do escorregamento (rupturas de adutoras e tubulações).

Os escorregametos decorrentes de ruptura/vazamentos de tubulações não são fáceis de serem previstos; porém, no caso da precipitação antrópica, é possível utilizar a proposta de Assunção (2005) para mensurar os valores com relativa precisão.

Tabela 3. Relação entre precipitação antrópica e precipitação pluviométrica para o Alto da Boa Vista, Salvador-Ba (ASSUNÇÃO, 2005).

Ano	Precipitação pluviométrica, Lw,PP (mm)	Precipitação antrópica, Lw,PA (mm)	Lw,PA / Lw,PP (%)
1976	1429,80	1328,80	92,94
1980	1951,50	1348,35	69,09
1992	1576,70	1249,02	79,22
1988	1791,00	1266,58	70,72
2002	1827,20	1252,49	68,55

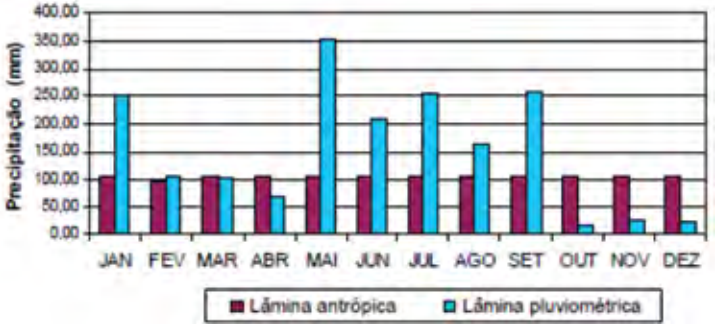


Figura 31. Comparação entre precipitações pluviométrica e antrópica mensais para o ano de 2002 (ASSUNÇÃO, 2005).

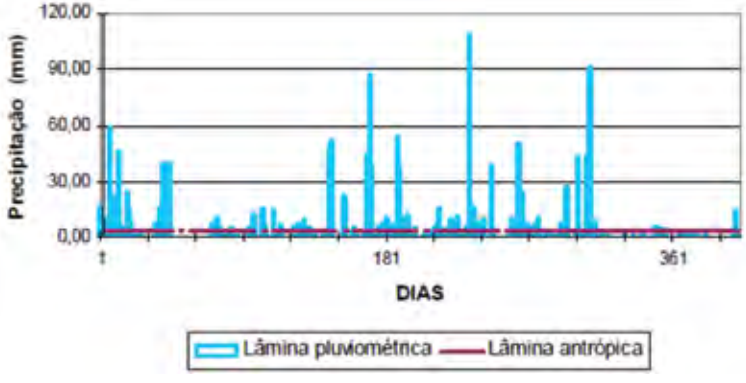


Figura 32. Comparação entre precipitações pluviométrica e antrópica diárias para o ano de 2002 (ASSUNÇÃO, 2005).

Conclusões

Algumas encostas e taludes têm nível freático sazonal (apenas na estação mais chuvosa). Quando isso ocorre, o escorregamento está associado à elevação do nível freático. O principal agente preparatório e deflagrador é a infiltração decorrente da precipitação da água da chuva.

A característica mais comum das encostas é ter uma espessura pequena de solo coluvionar ou solo maduro sobreposto a um solo menos permeável ou rocha pouco fraturada. A infiltração depende das condições não saturadas, pois pelo menos o solo superficial permanece não saturado. Assim, os mecanismos de infiltração apresentados no Capítulo 24 neste mesmo livro são válidos nesses casos. Os mecanismos semelhantes a esses podem ser causas de desastres naturais.

Pesquisas desenvolvidas na Itália indicam que o estudo dos solos não saturados pode ser importante para explicar os mecanismos que deflagram alguns tipos de corrida e que também devem ocorrer nos escorregamentos brasileiros. Há diferença substancial quando o material escorregado está próximo à saturação ou está em condições não saturadas. As corridas de lama observadas na Itália estão associadas à liquefação pós-ruptura em condições saturadas. Infiltrações decorrentes de chuvas prolongadas podem saturar o solo e, inclusive, gerar pressão de água positiva rapidamente, cujo escorregamento resultante pode ser um tipo de mecanismo detonador de corridas, conforme relatos na Noruega.

Nas encostas ocupadas irregularmente, nas quais há lançamento sem controle de águas residuárias, há um risco maior de escorregamento decorrente da infiltração adicional dessas águas. A ordem de grandeza da contribuição das águas lançadas nas encostas pode dobrar a média de precipitação anual. A taxa de infiltração das águas residuárias é praticamente constante e, por isso, é um importante agente preparatório para os escorregamentos. Além das águas residuárias, outra fonte de infiltração de origem não natural é o vazamento de tubulações. Há relatos de escorregamentos que só se justificam se for considerada a contribuição da infiltração adicional de origem antrópica.

Agradecimentos

O autor agradece ao CNPq, à CAPES e ao REAGEO/INCT pelo auxílio financeiro; aos alunos Flávio Franch, Danielle Melo e Silvia Suzuki, que trabalharam na área de estabilidade de taludes e têm os resultados citados neste livro; aos professores Cláudio Wolle e Willy Lacerda, que sempre têm colaborado com nosso grupo de pesquisa.

Referências bibliográficas

ANDRADE, M. H. N.; DE CAMPOS, T. M. P.; VARGAS JR., E. A. (1992). Retroanálise do escorregamento da Encosta do Cactáreo. I Conferência Brasileira de Estabilidade de Ecostas, v. 1, p. 161-172.

ASSUNÇÃO, D. M. S. (2005). Padrão quali-quantitativo do descarte de águas residuárias em áreas carentes: um estudo no Alto do Bom Viver em Salvador. Dissertação (Mestrado em Engenhaira Ambiental, UFBA, Salvador

CASCINI, L.; SORBINO, G. (2003). The contribution of soil measurements to the analysis of flowslide triggering. *In*: International Workshop on: Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes And Earthfills, Napoli.

DE CAMPOS, T. M. P.; AMARAL, C. P.; MONCADA, M. P. H.; VELOS, R. Q. (2005). Avaliação preliminar das causas de ruptura de uma encosta de Nova Friburgo, RJ. IV Conferência Brasileira de Estabilidade de Ecostas, v. 2, p. 721-732.

DE CAMPOS, T. M. P.; MONCADA, M. (2008). Modelos computacionais aplicados a geologia de engenharia – Retroanálise do Túnel Rebolças. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Porto de Galinhas.

EDGERS, L.; NADIM, F. (2004). Rainfall – induced slides of unsaturated slopes. Rio de Janeiro. Int. Symp. on Landslides, p. 1091-1096.

FEIJÓ, R. L.; VIEIRA, L. O. M.; MAIA, H. S. (2009). Escorregamento de talude a montante do emboque Norte-Sul do Túnel Relboças – Rio de Janeiro – cronologias e causas do acidente, ações emergenciais e projeto de recuperação. V Conferência Brasileira de Estabilidade de Ecostas. São Paulo, ABMS, 2009. v. 1. p. 187-198.

FERREIRA, S. R. M.; LIMA, A. F. (2005). Influência da cariação da frente de umedecimento na análise de estabilidade de encosta do Alto do Reservatório no Recife. IV Conferência Brasileira de Estabilidade de Ecostas, v. 2, p. 583-589.

FRANCH, F. A. (2008). Efeito da impermeabilização na infiltração provocado pela chuva em taludes. Dissertação (Mestrado em Enganharia Civil) EPUSP, São Paulo

FRANCH, F. A. J.; FUTAI, M. M. (2009). Influência da variação sazonal das pressões de água na estabilidade de talude não-saturado. V Conferência Brasileira de Estabilidade de Ecostas, São Paulo, ABMS, v. 1, p. 141-148.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JR., E. A.; DE CAMPOS, T. M. P. (2011). Back analysis of a landslide in residual soil slope in Rio de Janeiro, Brazil. Soils & Rocks, v. 14, p. 139-149.

GUSMÃO FO, J. A.; FERREIRA, S. R. M.; AMORIM JR., W. M. (1997). Escorregamentos em morros urbanos de Recife: o caso do Boleiro. II Pan-Am. Symp. Landslides, Rio de Janeiro, p. 985-994.

JESUS, A. C. (2008). Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados. Dissertação (Mestrado em Geotecnia EESC-USP, São Carlos.

MATSUSHI, Y.; HATTANJI, T.; MATSUKURA, Y. (2006). Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. Geomorphology 76, p. 92-107.

Novo milênio. Autor não identificado. Disponível em: http://www.novomilenio.inf.br. Acesso em: 20/12/2010

OLIVARES, L.; DAMIANO, E. (2007). Postfailure mechanics of landslides: laboratoty investigation of flowslide in pyroclastic soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 133, n. 1, 2007.

SANTOS, L. A.; ASSUNÇÃO, D. M. S (2005). Vazões de águas resisuárias descartadas nas cristas dos taludes de assentamentos urbanos carentes. IV Conferência Brasileira de Estabilidade de Ecostas, p. 797-809.

VARGAS, M. (1999). Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar. Solos e Rochas, v. 22, p. 53-83.

VARGAS, M.; Picher, E. (1957). Residual soil and rock slides in Santos-Br. ICSMFE. v.1, p. 67-71.

WOLLE, C. M. (1988). Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas. Doutorado em Engenharia Civil. EPUSP. São Paulo.

Capítulo 26
Infiltração e movimentos de massas coluvionares saturadas

Marcos Massao Futai
Willy Alvarenga Lacerda
Silvia Suzuki

1 Introdução

Os depósitos coluvionares formados em clima tropical (elevada temperatura e muita chuva), como do Brasil, têm características distintas dos solos com mesma a designação do hemisfério norte (mais argilosos ou formados por erupções vulcânicas). Os depósitos coluvionares ocorrem em várias encostas, sendo muito comuns na Serra do Mar, por exemplo. Nas obras lineares, tais como rodovias, ferrovias, dutovias, linhas de transmissão, etc., quase sempre precisam atravessar massas coluviais instáveis.

O índice de vazios é um índice físico que pode ser usado para diferenciar os colúvios, pois é, geralmente, maior que a camada de solo residual. Esses valores estão entre: (a) 0,6 a 0,9 em solos saprolíticos; (b) 0,7 a 1,5 em solos residuais de gnaisse granito, e (c) 1,0 a 2,5 em solos coluvionares (LACERDA, 2004). Amaior porosidade no solo coluvionar reflete na permeabilidade; por isso, em geral, os solos coluvionares são mais permeáveis que os solos residuais. Isso foi mensurado por vários pesquisadores, tais como Futai (2002), que estudou um perfil de intemperismo de solo com origem gnáissica, e Lacerda e Lopes (1992), que realizaram ensaios no maciço do Corcovado. Porém, essa variação de permeabilidade saturada com a profundidade não pode ser generalizada, pois, nos casos estudados por Wolle (1988), demostrou-se justamente o contrário, conforme já discutido por Futai *et al.* (2011a) neste mesmo livro.

O escorregamento em solos residuais pode ocorrer por uma das causas (redução de sução ou geração de rede de fluxo temporária) apresentada Nos Capítulos 23 e 24. O depósito desses escorregamentos, ao longo dos taludes, pode formar espessas acumulações de solos e blocos, que são os depósitos coluvionares. Profundidades de 30 m, ou mais, de solos coluvionares podem ser observadas ao longo das estradas e outras obras, preenchendo depressões originais do terreno. No Rio Grande do Sul, existem muitos depósitos coluvionares derivados de rochas basálticas os quais têm muitas características (velocidade de deslocamento, nível freático, inclinação da encosta, etc.) em comum com os colúvios do gnaisse-granito, típicos da região sudeste.

As encostas com solo coluvionares com inclinação elevada (maiores que 30º), em geral, não têm nível freático elevado e, por isso, podem estar sujeitos a escorregamentos verdadeiros. O comportamento frente à infiltração foi discutido por Futai *et al.* (2011a) neste mesmo

livro. Os depósitos com baixa declividade apresentam comportamento diferente. Quando instáveis, essas massas coluvionares saturadas se movem na forma de rastejo ou em escorregamento ativo lento e contínuo.

2 Mecanismos de instabização em depósitos coluviovionares

De acordo com Barata (1969), o principal mecanismo de instabilização de taludes em solos coluvionares é provocado pelos movimentos de rastejo. A elevada permeabilidade da massa coluvionar permite sua saturação facilmente por infiltração das águas das chuvas, provocando movimentos lentos. À medida que o movimento se processa, abre-se uma fenda na parte superior do depósito até o contato com o solo residual, facilitando ainda mais a infiltração de água.

O movimento, geralmente contínuo, sofre aceleração no período chuvoso. A ocorrência de chuvas de intensidade elevada pode levar o colúvio à ruptura. Esse processo pode ser agravado se forem realizados cortes no pé do talude (D'APPOLONIA *et al.*, 1967). O processo de instabilização de massas coluvionares em movimento de rastejo envolve: parâmetros de resistência residual (coesão nula e ângulo de atrito residual), elevação do nível piezométrico da encosta e precipitação pluviométrica. Segundo Lacerda (2002), a instabilização de taludes coluvionares com nível freático próximo à superfície pode ocorrer devido às seguintes situações:

- espontaneamente, quando o lençol permanece elevado devido à precipitação contínua – nesse caso, as velocidades de fluência aumentam, mas não há ruptura súbita, pois o solo se deforma no estado plástico, como mostra a Figura 1a;
- escavações, mesmo de pequena altura, no pé do talude, como pode ser visto na Figura 1b;
- carregamento no topo do talude, apresentada na Figura 1c;

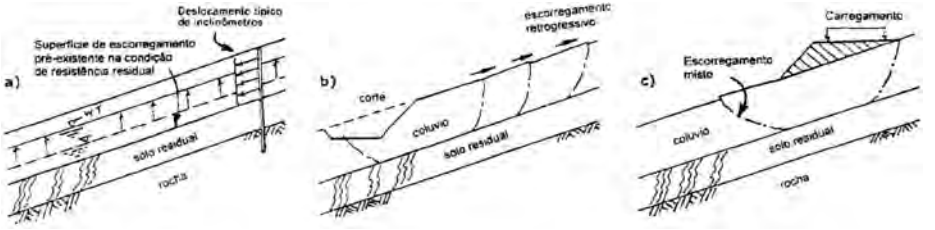


Figura 1. Processos de Instabilização de massas coluviais saturadas (LACERDA, 1997).

- por choque (AVELAR, 1996) ou carregamento súbito devido ao novo escorregamento a montante.

Lacerda (2002) associou quatro processos de movimento em colúvios com as condições de fluxo d'água no talude:

- injeção de água através de veios permeáveis na rocha matriz, como mostra a Figura 2a;
- choque de blocos de rocha de grandes dimensões numa massa saturada, como descrito por Lacerda (1997);
- bloqueio do fluxo na camada subjacente de solo residual por um dique impermeável, apresentado na Figura 2b;
- pequenas variações de permeabilidade na massa coluvial.

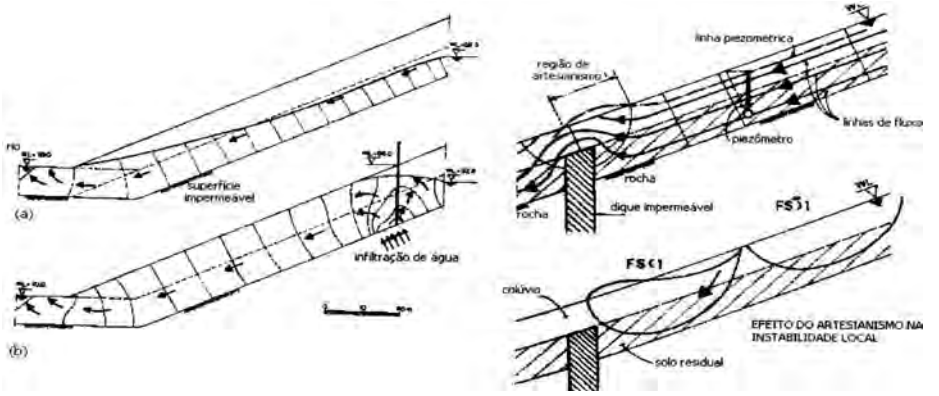


Figura 2. (a) e (b) Injeção de água sob pressão; (c) e (d) dique impermeável mudando direção do fluxo subterrâneo (LACERDA, 1997).

Lacerda (1966) idealizou a distribuição de velocidade de deslocamento ao longo de uma seção AA (Figura 3), inicialmente vertical, para caracterizar o movimento em:

a) escorregamento com plano de movimentação BB (Figura 3a);
b) escorregamento translacional associado a uma zona de rastejo CC (Figura 3b);
c) fenômeno de rastejo típico, em que se acham representadas a zona sazonal, superior, e a zona constante, de posição inferior (Figura 3c). Através do conhecimento da distribuição de velocidades em profundidade, é possível classificar corretamente o tipo de movimento em ação.

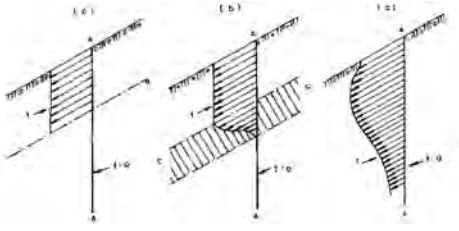


Figura 3. Distribuição das velocidades de deslocamento ao longo de uma secção (LACERDA, 1966).

3 Infiltração em solos coluvionares

A infiltração em solos coluvionares ocorre da mesma forma que nos demais solos, conforme descrevem Futai *et al* (2011-a) neste mesmo livro. A diferença básica decorre das características hidráulicas do solo. Os solos coluvionares são mais porosos que os solos residuais, por isso, muitas vezes, apresentam distribuição bimodal de poros que reflete na curva de retenção de água e também na função de condutividade hidráulica do solo. Mesmos os depósitos coluvionares saturados têm sua infiltração dependente das características não saturadas do solo. Dificilmente, nos depósitos de encostas, o solo tem nível freático coincidente com o nível do terreno em toda sua extensão. Assim, a parte do solo que interage com a atmosfera está não saturada, e a infiltração da água da chuva ocorre sob condições não saturadas.

Futai e Suzuki (2008) estudaram a infiltração de água para uma encosta localizada em Morretes, PR. Usaram dados reais de precipitação do ano de 2001 para fazer simulações numéricas unidimensionais para três perfis típicos: solo coluvionar C1 sobreposto ao solo residual R1, solo coluvionar C4 sobreposto ao solo residual R1 e o solo residual R1 sem cobertura de colúvio. As funções de permeabilidade desses solos estão apresentadas na Figura 4. Os dois solos coluvionares apresentam permeabilidade saturada maiores que a do solo residual; porém, como o valor de entrada de ar é baixo, por isso, os solos coluvionares tem redução da permeabilidade para baixos valores de sucção.

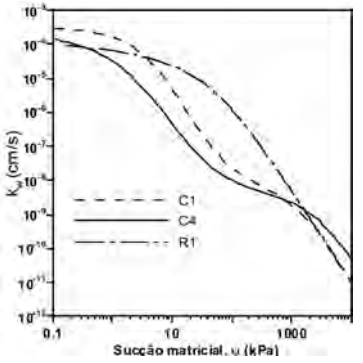


Figura 4. Funções de condutividade hidráulica para solos de Morretes-PR (Futai e Suzuki, 2008)

Os resultados das simulações numéricas realizadas estão mostrados na Figura 5. O nível freático foi mantido a 20 m de profundidade, pois o objetivo de Futai e Suzuki (2008) era de verificar a infiltração na zona não saturada. Em condições reais, sobretudo nas encostas recobertas por colúvios instáveis, o nível freático deve flutuar e ficar mais próximo da superfície.

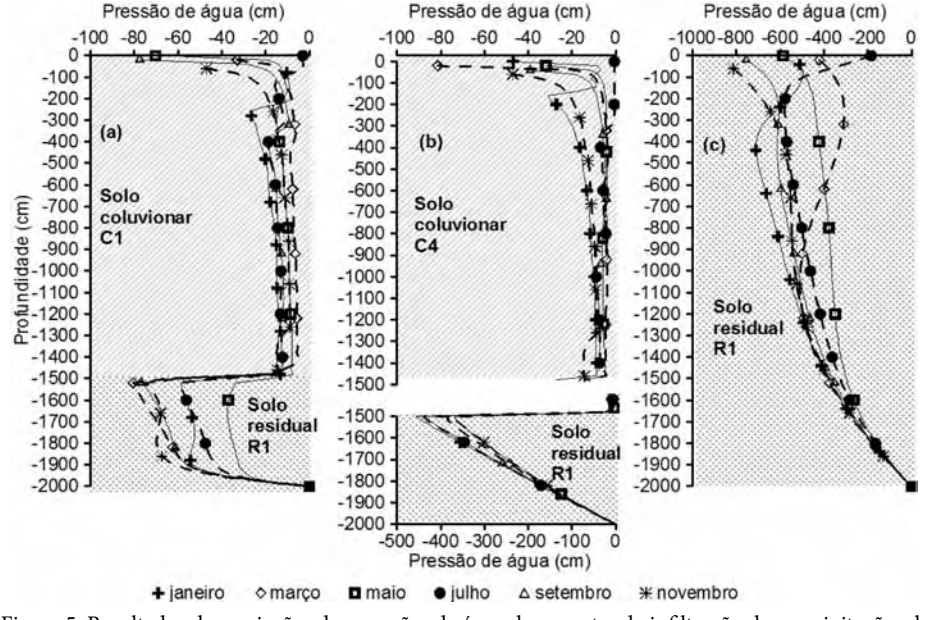


Figura 5. Resultados das variações das pressões de água decorrentes da infiltração das precipitações de 2001 nos solos de Morretes, PR (FUTAI e SUZUKI, 2008).

No caso do perfil com camada de solo coluvionar, há uma brusca variação de sucção (Figuras 5a e 5b) na transição entre o solo coluvionar e solo residual. Pode-se observar que a existência da capa coluvionar C1 sobre o solo residual provocaria elevação do nível freático mais intensamente que no caso de um solo residual sem cobertura. Ao contrário da camada de solo coluvionar C4, o contraste entre as propriedades hidráulicas promove uma grande diferença de sucção na interface (Figura 5b). Devido à sucção mais elevada no solo residual nessa condição, a infiltração nessa interface é barrada, formando uma "barreira capilar natural". Estudos mais complexos envolvendo fluxo em encostas precisam ser reavaliados usando esses conceitos. No perfil de solo residual sem cobertura, a sucção varia entre 20 a 80 kPa, e os valores são maiores na superfície. O nível de sucção é substancialmente maior do que no caso dos solos coluvionares.

É importante lembrar que há casos de encostas recobertas por colúvios em que não há formação de nível freático, tal como ocorre na Serra do Mar no trecho de Cubatão, conforme descreveu Wolle (1988). Isso ocorre porque a permeabilidade é crescente com a profundidade e o nível d'água fica permanentemente na rocha fraturada a mais de 30 m de profundidade. Assim, a água que infiltra segue uma trajetória vertical.

Nos casos em que a encosta é íngreme e o solo coluvionar fica sobreposto a um solo residual menos permeável ou sobre uma rocha impermeável, podem ocorrer escorregamentos translacionais. O mecanismo é diferente do que será estudado neste capítulo e foi tratado por Futai *et al.* (2011a) neste mesmo livro.

4 Casos de escorregamentos em solos coluvionares

Para avaliar a influência da infiltração nas encostas cobertas por solos coluvionares saturados, serão apresentados alguns casos compilados da literatura, nos quais se relaciona a precipitação da chuva com dados de instrumentação. Ao final deste capítulo, será apresentada uma comparação dos casos, com objetivo de organizar os ensinamentos deixados pelo conjunto de informações disponíveis.

4.1 Movimentação de tálus junto à Usina Henry Borden

Um dos escorregamentos da massa de tálus mais antigos (brasileiros) relatados na literatura ocorreu em 1946, junto à Usina Henry Borden, no Município de Cubatão, no Estado de São Paulo, e foi relatado por Vargas (1966). Um antigo depósito de tálus (ou colúvio) teve seu movimento reativado devido a um corte de 60% de inclinação e 40 m de altura no pé da encosta, durante as obras da usina. Essa obra ocorreu no período mais chuvoso. A massa instabilizada tinha um volume de aproximadamente 500.000 m³ de material e se movia em função da oscilação do nível freático decorrente da infiltração da água da chuva.

Para controlar o movimento, foram abertos túneis através do material instável e foram feitos furos com sonda rotativa, a partir do fundo das galerias. A Figura 6 mostra a disposição dos túneis e dos drenos em planta. A seção geotécnica mostra o corpo de tálus sobreposto ao xisto decomposto e esse outro sobre a rocha xistosa fissurada.

A instrumentação da encosta foi feita por meio de pontos de referências alinhados e medidores de nível d'água. Terzaghi (1960) interpretou os dados e concluiu que parte da água que instabilizava a massa de tálus vinha da rocha fraturada. Como a principal fonte de recarga era a infiltração da água da chuva, foi realizada uma impermeabilização superficial com pintura asfáltica, além de execução de valas para drenagem superficial. Terzaghi acreditava que a drenagem seria tão efetiva, que um rebaixamento de 3 m do lençol freático seria capaz de estabilizar o movimento. A velocidade do movimento atingiu um valor máximo de 30 cm por dia e, após a execução da estabilização, o movimento foi reduzido praticamente a zero, como mostra a Figura 7.

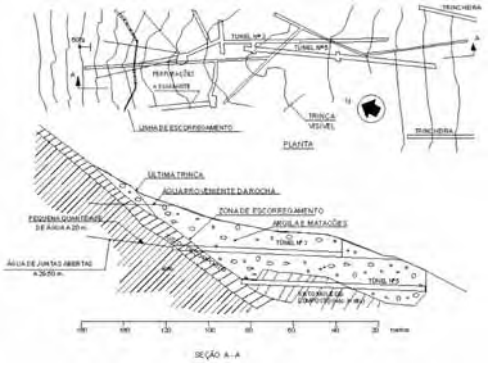


Figura 6. Planta e seção longitudinal do escorregamento da Usina Henry Borden, em Cubatão (VARGAS, 1966).

Figura 7. Diagrama mostrando a relação entre a posição do nível d'água e os deslocamentos horizontais (GUIDICINI e NIEBLE, 1976).

4.2 Escorregamento da Serra do Mar na área da cota 500 (Curva da Onça) da Via Anchieta em São Paulo

Teixeira e Kanji (1970) descreveram os escorregamentos da encosta da Serra do Mar na Via Anchieta, em São Paulo, na área denominada de Cota 500, ocorridos no final de 1964, abrangendo uma área de cerca de 200.000 m². A geologia é constituída por mica-xistos devido à ocorrência de intercalações xistosas no gnaisse. Sobrepostos às rochas e seus correspondentes solos residuais ocorriam dois depósitos de tálus (colúvios) onde aconteciam os escorregamentos. Os depósitos de tálus apresentavam-se saturados de água, com várias surgências e represamentos superficiais.

Com o mapeamento das cicatrizes e fissuras dos escorregamentos, pôde-se delimitar: a área em movimento, sua direção principal de deslocamento, a ocorrência de escorregamentos secundários e a estimativa da profundidade do movimento.

O mapeamento da área da Cota 500 está apresentado na Figura 8, em que estão indicados os elementos geológicos do embasamento aflorante e os elementos observáveis dos escorregamentos. Através dos dados de investigação (sondagens, ensaios, instrumentação) foi traçada a seção AA, longitudinalmente ao escorregamento (Figura 9). Há uma capa superior de tálus com espessura de 4 a 8 m, constituído de argilas e areia de granulação variada, e com muitos matacões distribuídos aleatoriamente. Sob o tálus, ocorre o horizonte de solo residual de mica-xisto com acamamento e bandeamento herdados da rocha, cuja espessura chega a 30 m. Há lentes de areia, mas o material pode como um todo ser caracterizado com um solo argiloso plástico e facilmente amolgável.

O máximo deslocamento horizontalmedido no período de 6 meses, referente aos 190 marcos superficiais instalados na área, foi superior a 25 m e os deslocamentos verticais foram superiores a 8 m. As cristas dos escorregamentos chegaram a atingir tanto a pista ascendente como a descendente.

Após os estudos, os autores verificaram que a encosta era instável e os movimentos eram intensificados pela percolação associada com a infiltração das águas das chuvas. A estabilização foi realizada através de DHPs longos (comprimentos superiores a 100 m) associados com impermeabilização superficial para reduzir a infiltração da água da chuva. Os drenos começaram a ser instalados da crista para o pé.

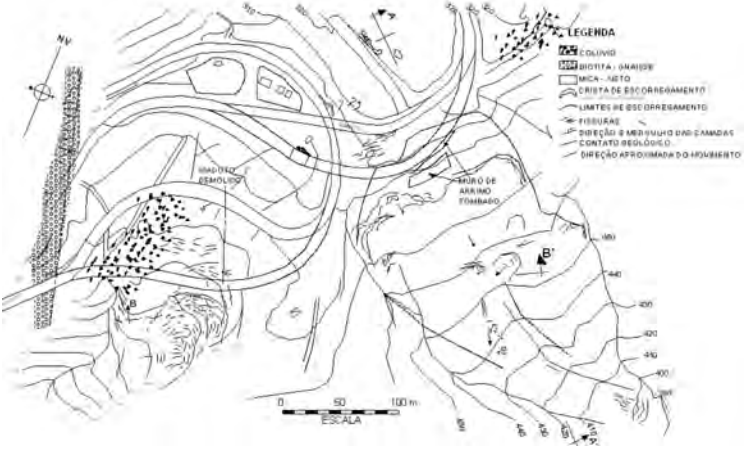


Figura 8. Planta da área da Cota 500 com mapeamento geológico de superfície e das cicatrizes dos escorregamentos (TEIXEIRA e KANJI, 1970).

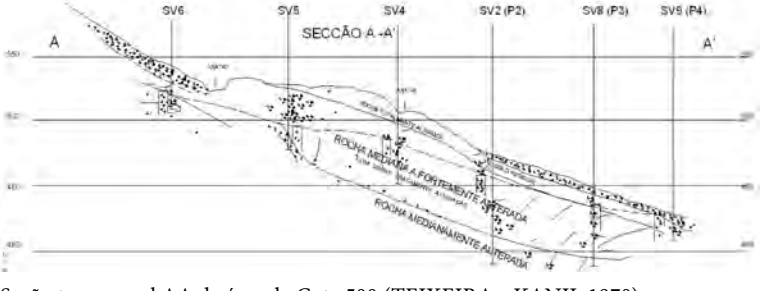


Figura 9. Seção transversal AA da área da Cota 500 (TEIXEIRA e KANJI, 1970).

Em alguns drenos, a vazão após a perfuração chegou a 20 m³/hora por algumas horas e após a estabilização passava a variar em função da infiltração proveniente da chuva. O sistema funcionou perfeitamente, conforme pode se ver na Figura 10. A estabilização ocorreu em função do número de drenos instalados.

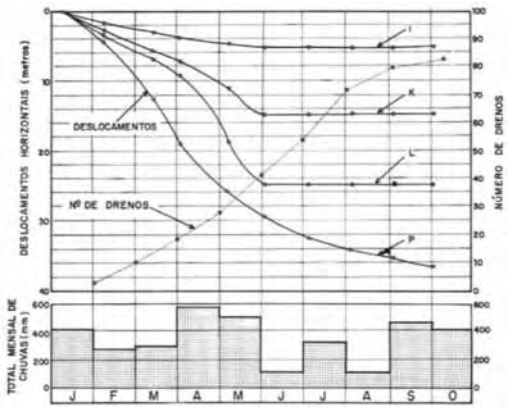


Figura 10. Deslocamentos, números de drenos e chuvas mensais (TEIXEIRA e KANJI, 1970).

4.3 Morro dos Urubus

Em 8 de abril de 1966, ocorreu um escorregamento no Morro dos Urubus, subúrbio do Rio de Janeiro. O perfil geotécnico é formado por uma capa coluvionar de 17 m de espessura sobreposta a um solo residual de biotita-gnaisse arenoso e está apresentado na Figura 11. Moreira (1974) apresentou dados de ensaios de laboratório e instrumentação em detalhes.

Por meio da análise dados de piezometria, Moreira (1974) concluiu que havia a formação de um lençol artesiano no solo residual decorrente da cobertura de colúvio. Analisando os dados de caracterização apresentados por Moreira (1974), foi possível fazer o perfil de distribuição granulométrica e de limites, conforme pode ser visto na Figura 12. Não há diferença significativa dos limites de consistência entre os solos coluvionar e residual, porém, há uma diferença marcante na granulometria. A quantidade de argila e silte no solo coluvionar é bem superior à do solo residual. Essa composição pode explicar por que a camada superior faz uma barreira para formar um nível artesiano. O monitoramento da piezometria permitiu que Moreira (1974) concluísse que havia um tempo de retardo de 1 a 2 dias entre a ocorrência da precipitação e a variação do nível freático. Também observou que era necessário uma chuva acumulada em 4 dias para explicar a subida do nível freático em 5 m. Esses dados demostram que a infiltração e a contribuição da hidrogeologia nas encostas formadas em depósitos coluvionares são os fatores preponderantes para instabilização.

Os piezômetros foram instalados após a ruptura, em janeiro de 1967, e também suas leituras não representaram as condições ocorridas na ruptura, em 16 de abril de 1966. Entretanto, de fevereiro até abril de 1967 a variação do lençol freático no piezômetro P-11, próximo do contato com o afloramento de rocha e inserido no solo saprolítico, variou de 10 m a 4 m de profundidade, correlacionando-se razoavelmente bem com as chuvas acumuladas de 15 dias, que atingiram cerca de 400 mm.

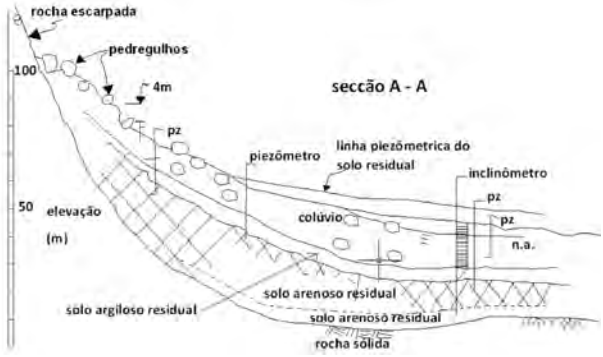


Figura 11. Seção geotécnica mostrando a superfície de escorregamento e o nível piezométrico (MOREIRA, 1974).

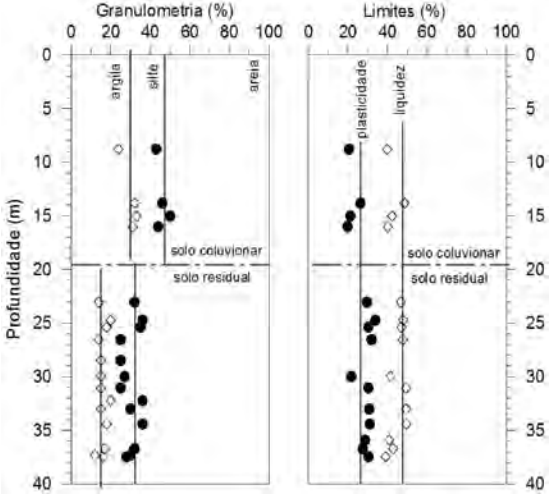


Figura 12. Perfil de distribuição granulométrica e de limites de Atterberg do Morro dos Urubus (interpretação dos dados de MOREIRA, 1974).

Tal diferença na variação da linha piezométrica teve bastante influência na recarga do aquífero abaixo da infiltração do contato solo-rocha. No mesmo período, o piezômetro P-14, instalado na base do solo argiloso, variou de 5 m de profundidade até a superfície do terreno e respondeu bem com os 25 dias de chuva acumulada, conforme está mostrado na Figura 13. A ruptura ocorreu em um período em que a chuva acumulada foi de 350 mm, enquanto a máxima foi de quase 600 mm, registrada em janeiro de 1967.

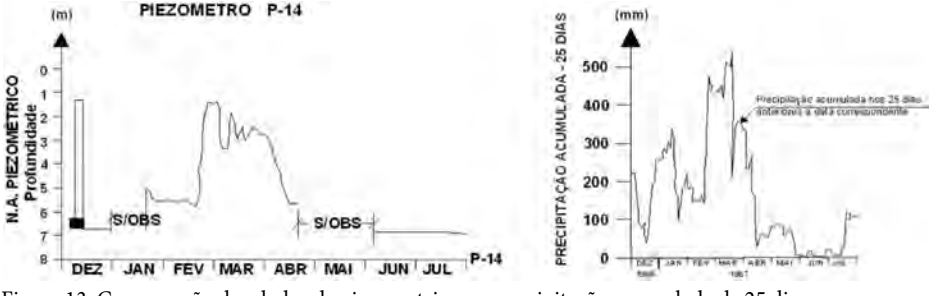


Figura 13. Comparação dos dados de piezometria com precipitação acumulada de 25 dias para a encosta do Morro dos Urubus (MOREIRA, 1974).

4.4 Angra do Reis

Brugger *et al.* (1994), Borda Gomes (1996) e Lacerda (1997) apresentaram estudos sobre uma massa coluvionar que se move sazonalmente, o que é causado pela flutuação do nível freático. Trata-se de um movimento em que a superfície de deslizamento fica quase sempre submersa, porém a elevação da pressão positiva da água acelera a movimentação. Na Figura 14, está apresentada a seção transversal da encosta.

A espessura do solo coluvionarsilte arenoso chega até 20 m de espessura e está sobreposta a um solo residual jovem silte arenoso de granito-gnaisse. A permeabilidade saturada dos dois solos é alta ($2x10^{-2}$ cm/s). A massa instável tem extensão de 350 m de comprimento, 120 m de largura e 20 m de espessura, o que representa 8000.000 m^3 de volume. A inclinação média é de 17º. Os parâmetros geotécnicos obtidos em laboratório foram relatados por Brugger *et al.* (1994). O fluxo é quase paralelo à superfície e a , a existência de artesianismo próximo à crista do talude foi relatado por Borda Gomes (1996).

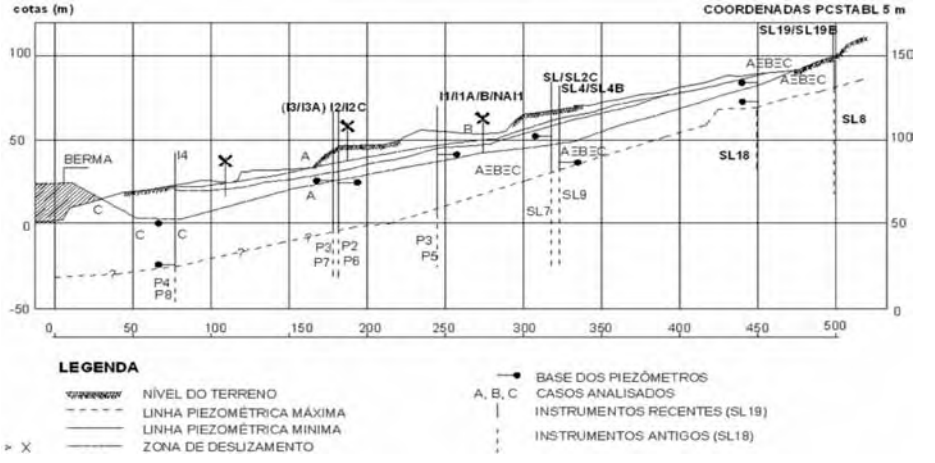


Figura 14. Seção transversal da encosta de Angra dos Reis (BORDA GOMES, 1996).

O histórico de movimentação começou a ser relatado em 1978, quando ocorreram obras de escavação. Desde então a encosta foi instrumentada e monitorada. Foram instalados vários drenos sub-horizontais profundos para rebaixar o lençol freático, bermas de estabilização e cortinas em diferentes fases de intervenção. Apesar de o movimento da encosta de Angra dos Reis ser de uma massa saturada, a principal fonte de recarga da variação do nível freático é a chuva. No caso das encostas em rastejo similares a esse caso, o comportamento hidrogeológico não pode ser correlacionado com chuvas de 4 dias, tal como são os casos de escorregamentos citados anteriormente. A Figura 15 mostra uma direta relação entre o nível piezométrico com 25 dias de chuva acumulada para o colúvio em Angra dos Reis, resultante do estudo de Borda Gomes (1996).

A infiltração causada pela chuva acumulada e consequente alteração do nível piezométrico provocam a movimentação da encosta. A Figura 16 mostra o deslocamento de um inclinômetro (BORDA GOMES, 1996). Quando os 25 dias de chuva acumulada atingem um valor de 200 mm, há um movimento ao longo de uma superfície de escorregamento profundo.

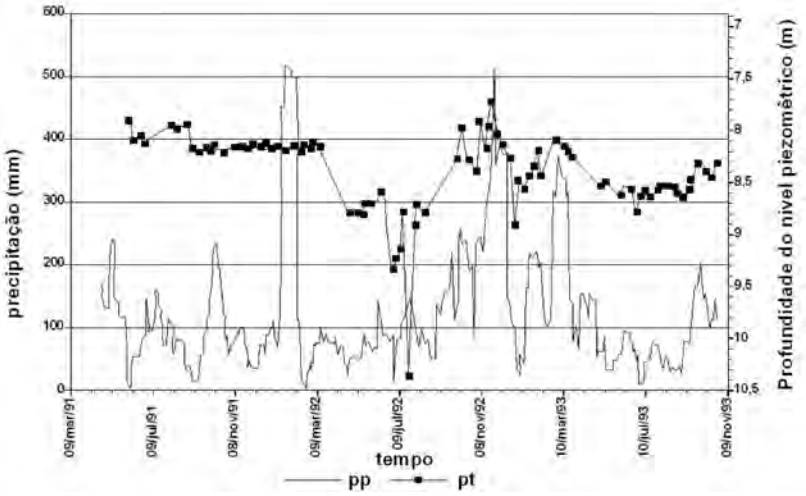


Figura 15. Comparação entre dados de piezomentria e precipitação acumulada em 25 dias para a encosta de Angra dos Reis (BORDA GOMES, 1996).

4.5 Escorregamento em Itacuruça-RJ

O oleoduto,ORBIG, da TRANSPETRO atravessa um colúvio próximo da cidade de Itacuruçá, a 70 Km do Rio de Janeiro. O duto está enterrado a 3 m no terreno. Os deslocamentos horizontais medidos em um dos inclinômetros e os deslocamentos do oleoduto situado no local indicaram a existência de duas "línguas" coluvionares, como mostrado na Figura 17. Em cerca de 40 anos, o duto foi arrastado para baixo cerca de 4 metros, formando um arco.

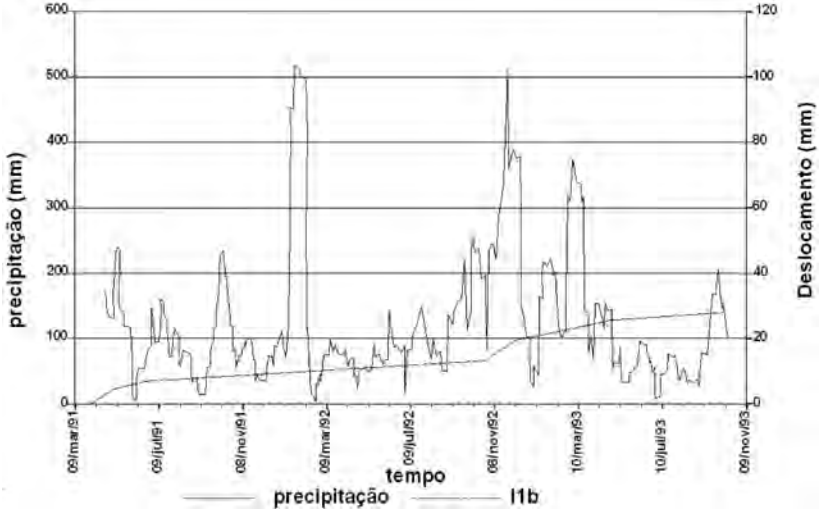


Figura 16. Comparação entre dados de deslocamentos e precipitação acumulada em 25 dias para a encosta de Angra dos Reis (BORDA GOMES, 1996).

Figura 17. Topografia da encosta de Itacuruçá e instrumentação (FREITAS, 2004).

A Figura 18 mostra a seção do principal colúvio e as leituras mais recentes. Existe claramente uma superfície de escorregamento de separação de colúvio do substrato. A rocha de base é um gnaisse. Um grande número de blocos rochosos, alguns com cerca de 10 metros de diâmetro, sobre a superfície e também no solo coluvionar foram encontrados. O solo coluvionar é uma areia fina siltosa, muito micácea. A água subterrânea está relativamente próxima da superfície.

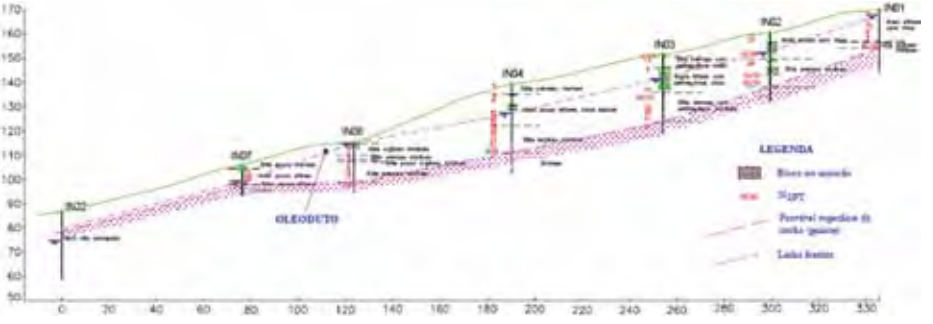


Figura 18. Seção longitudinal do escorregamento de Itacuruçá (FREITAS, 2004).

Durante as chuvas de 2003 e 2004, o movimento foi medido por 28 inclinômetros. A Figura 19 mostra esses movimentos para o inclinômetro IN-04. A Figura 20 ilustra a evolução de movimentos de sete inclinômetros de março de 2003 a abril de 2004. Os movimentos da superfície são plotados junto com o gráfico da chuva acumulada de 25 dias no mesmo período de um pluviógrafo instalado na área. Percebe-se que os movimentos ocorrem quando a chuva acumulada é maior que 250 mm.

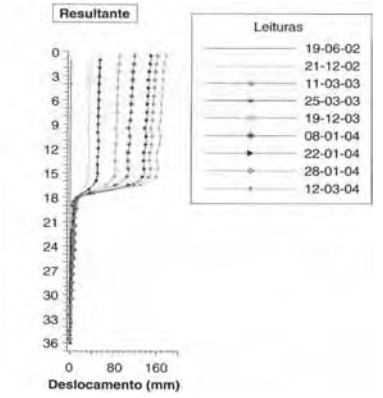


Figura 19. Dados do Inclinômetro IN-04 do escorregamento de Itacuruçá (FREITAS, 2004).

A aceleração do movimento ocorreu em janeiro de 2004, quando houve um pico de intensidade da chuva, que atingiu o valor de 60 mm/h. Também foi notado que mediante a intensidade de chuva menor que 30 mm/h não houve movimento perceptível (FREITAS, 2004).

A periodicidade de leituras dos dados de piezometria não foi adequada para interpretar a influência da precipitação na variação do nível piezométrico, conforme pode-se ver na Figura 20. Porém, a partir de fevereiro de 2004 (Figura 21) as correlações entre o nível piezométrico e as chuvas acumuladas de 25 apresentam boa correspondência.

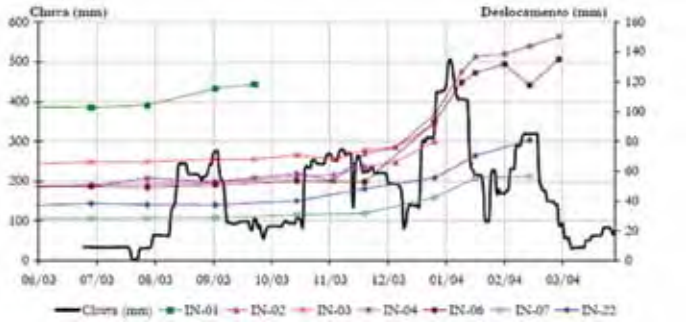


Figura 20. Deslocamento da encosta e precipitação acumulada de 25 dias da encosta de Itacuruçá (FREITAS, 2004).

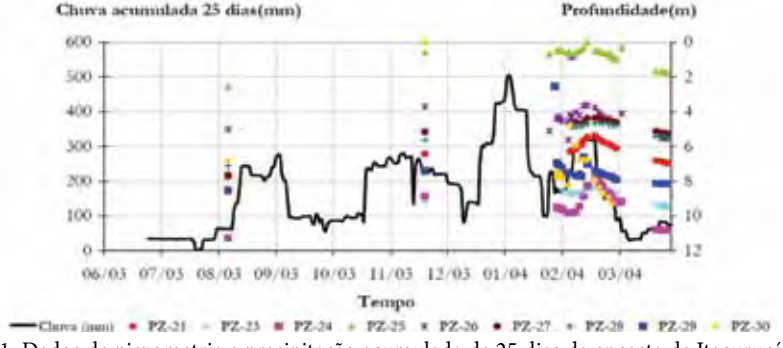


Figura 21. Dados de piezometria e precipitação acumulada de 25 dias da encosta de Itacuruçá (FREITAS, 2004).

4.6 Escorregamento em Morretes-PR

Uma campanha mais detalhada em termos de instrumentação e ensaios de laboratório foi apresentada por Suzuki (2004) para a encosta onde há um oleoduto enterrado, o OLAPA da TRANSPETRO, localizada em Morretes, PR. O perfil geotécnico é constituído por depósito de solo coluvionar composto por argila siltosa saturada com presença de matacões, com espessura variando de 11 a 21 m, sobrejacente a uma camada de solo residual composto por silte arenoso, com espessura de 5 a 7 m sobre a rocha alterada de migmatito. A inclinação média da encosta é de 13º, como pode ser visto na Figura 22.

A instrumentação para monitoramento dos movimentos da encosta consistiu inicialmente em: 6 inclinômetros, 12 piezômetros e 1 pluviômetro. A região apresenta alta pluviosidade, principalmente entre os meses de janeiro e fevereiro, um dos fatores responsáveis pela instabilidade da encosta.

As obras para estabilização da encosta não estavam completamente implementadas; apenas a drenagem superficial tinha sido feita, quando, em fevereiro de 2001, após um período de chuvas intensas, o movimento da encosta foi acelerado, provocando um acréscimo de tensões no duto, levando-o à ruptura. A tubulação encontra-se parte instalada em uma massa de solo estável e um trecho paralelo à movimentação da massa coluvionar em rastejo, transmitindo esforços de tração na estrutura.

O projeto para estabilizar a encosta consistiu em drenagem superficial e instalação de drenos sub-horizontais profundos. Em função das vazões desses drenos e das leituras dos piezômetros, o projeto foi aperfeiçoado com a instalação de novos drenos para rebaixar o lençol freático. Isso diminuiu a velocidade da movimentação.

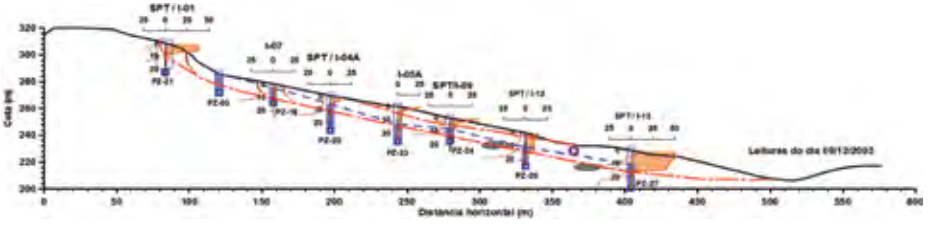


Figura 22. Seção geotécnica do escorregamento de Morretes, PR (SUZUKI, 2004).

Suzuki (2004) fez várias correlações entre os dados e identificou picos de chuva e aceleração de deslocamentos nos inclinômetros. A Figura 23 apresenta uma dessas correlações entre o inclinômetro I-11, o piezômetro PZ-25, vazão média dos drenos e precipitação pluviométrica acumulada a 25 dias.

Após a instalação do sistema de drenagem, não se verificou aumento significativo nos deslocamentos. Os picos no gráfico de precipitação acumulada indicados por i e ii, na Figura 23c, mostram que há picos correspondentes tanto no gráfico de vazão média dos drenos, como no gráfico de elevação piezométrica. O pico indicado por ii é maior que i no gráfico de precipitação acumulada, porém não obedece à mesma proporção no gráfico de elevação piezométrica (Figura 23b). Provavelmente, isso se deve ao sistema de drenagem instalado na encosta. Os drenos horizontais profundos foram bastante eficientes no rebaixamento do nível freático, constatado pelos piezômetros.

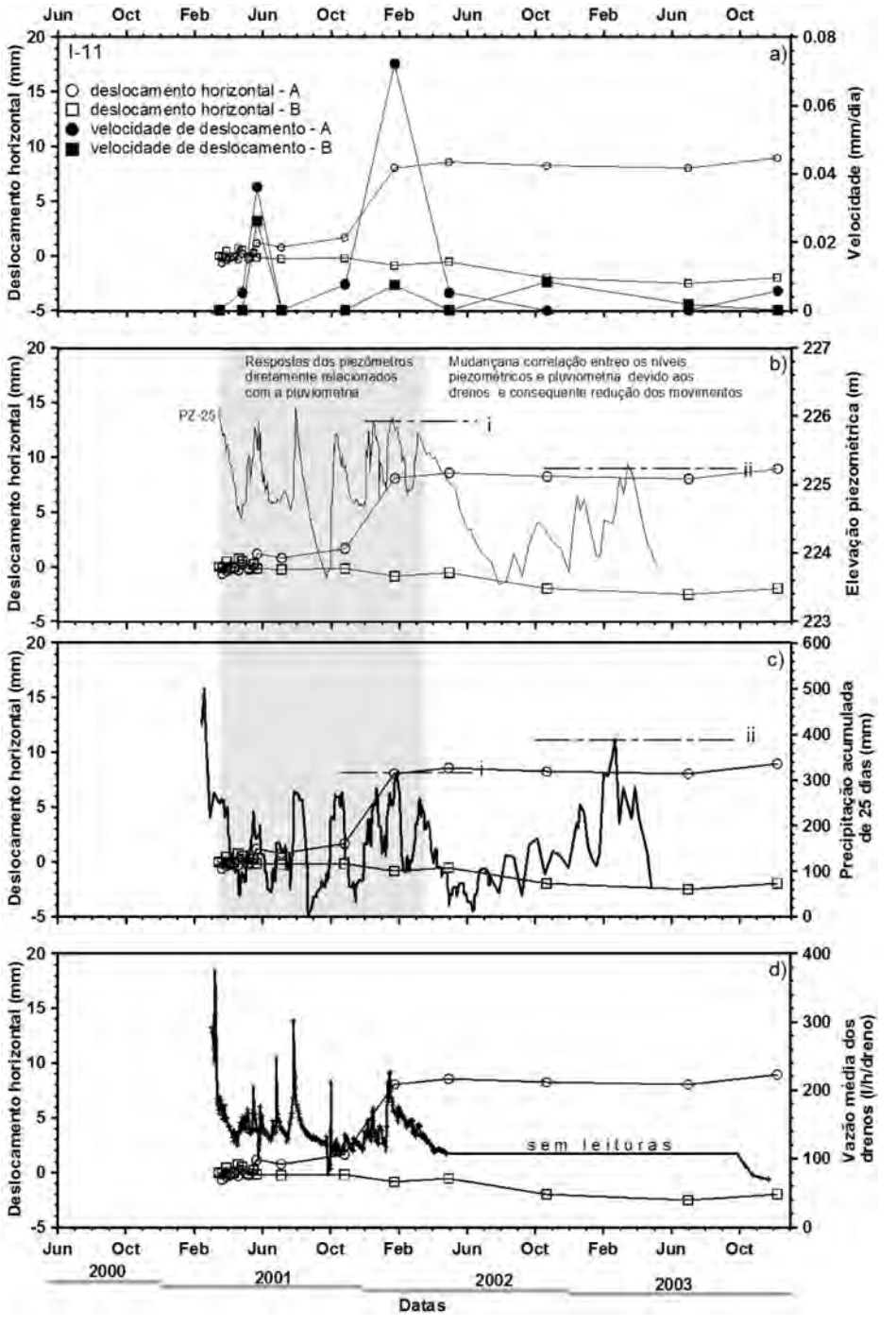


Figura 23. Correlação entre Inclinômetro I-11, Piezômetro PZ-25, Precipitação Acumulada a 25 Dias e Vazão Média dos Drenos (SUZUKI, 2004).

A oscilação do nível piezométrico que chegava a quase 4 m sem os drenos passou para menos de 2 m. Da mesma forma que nos casos anteriores, a infiltração decorrente de chuvas acumuladas em 25 dias comanda o movimento dessa massa coluvionar.

4.7 Escorregamento na Vila Albertina-SP

Godóis *et al.* (2009) e Futai *et al.* (2009 e 2011b) estudaram uma encosta localizada na zona norte da cidade de São Paulo. Trata-se de uma encosta isolada e que faz parte da Serra da Cantareira. Neste local há uma massa com 180.000 m³ de solo instável que se desloca de uma forma diferenciada dos casos clássicos de escorregamentos.

Diversos estudos, projetos e intervenções foram realizados nessa área nos últimos 20 anos; entretanto, a massa continua em movimento. Por meio de análise de documentos existentes, tais como fotos aéreas, plantas topográficas, relatórios, além de ensaios e instrumentação que foram realizados por Godóis (2011), foi possível identificar as causas do movimento. A área de estudo vem passando, desde a década de 50, por alterações feitas pelo homem.

A encosta foi utilizada como pedreira e área de empréstimo para jazida de solo. No pé da encosta foram realizados cortes e construído obras de contenção e parte dala foi ocupada irregularmente por uma favela.

O histórico completo pode ser consultado em Godóis (2011) e é possível resumi-lo em:

- década de 50 – a área foi explorada para ser uma pedreira, porém foi abandonada porque o maciço rochoso era muito profundo, o solo foi escavado, lançado sem controle e a área foi abandonada (Figura 24);

Figura 24. Aerofotografia de 1962 da região estudada (Geografia-FFLCH-USP).

- década de 60: no pé da encosta foi construída uma fábrica, as intervenções causaram escorregamentos e erosões (Figura 25);
- década de 70: houve intervenções para estabilização feitas pela fábrica, cortes para formar patamares e o terreno a montante foi ocupado por uma favela;
- década de 80: após chuva intensas, ocorreu ruptura de estruturas de contenções e uma área ao lado da massa instável foi usada como área de empréstimo para construção de um aterro sanitário (Figura 26);
- aos poucos a favela foi aumentando (Figura 27);
- a massa composta por aterros e colúvios se desloca sazonalmente, condicionada pelas infiltrações, por isso, em 2006, foi realizada remoção das residências localizadas na área instável (Figura 28).

Foram usados piezômetros, marcos superficiais einclinômetros para monitorar a encosta. A partir da análise desses resultados, foi possível delimitar a área massa instável em planta (Figura 29), além de traçar a seção geotécnica com a posição do nível piezométrico e a locação da superfície de escorregamento (Figura 30).

Figura 25. Aerofotografia 1967 (CESAD-FAU).

Figura 26. Aerofotografia 1994 (Geografia-FFLCH-USP).

Figura 27. Imagem de satélite (2000) (CESAD-FAU).

Figura 28. Imagem da área 2008 (Google Earth).

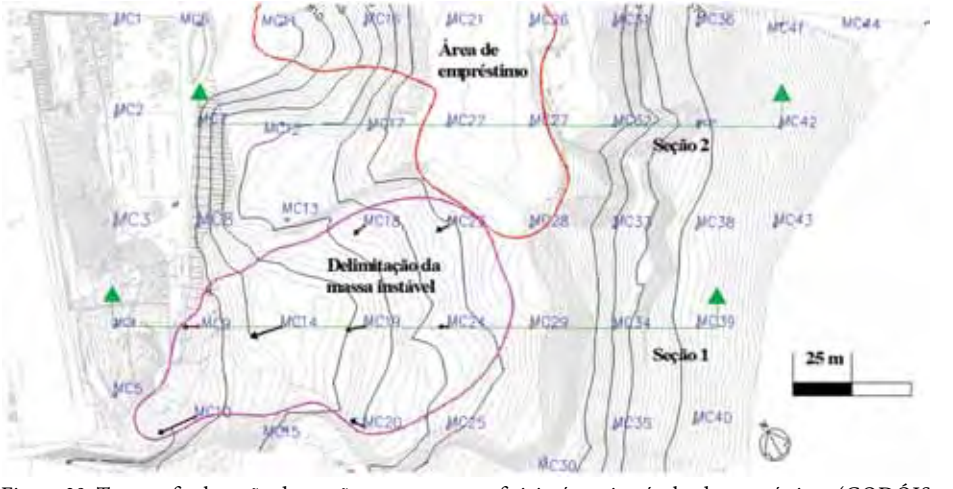


Figura 29. Topografia, locação das seções, marcos superficiais, áreas instável e de empréstimo (GODÓIS *et al.*, 2009).

Alguns marcos deslocaram-se mais de 1,5 m em 3 meses, como pode ser visto na Figura 31. A aceleração dos deslocamentos ocorre quando a chuva acumulada de 30 dias ultrapassa 150 mm. Os dados de piezometria indicam que o nível freático é elevado (inferior a 2 m de profundidade) na área instável e oscila pouco. Em pontos isolados apresenta artesianismo. A infiltração mais uma vez comanda o comportamento da encosta.

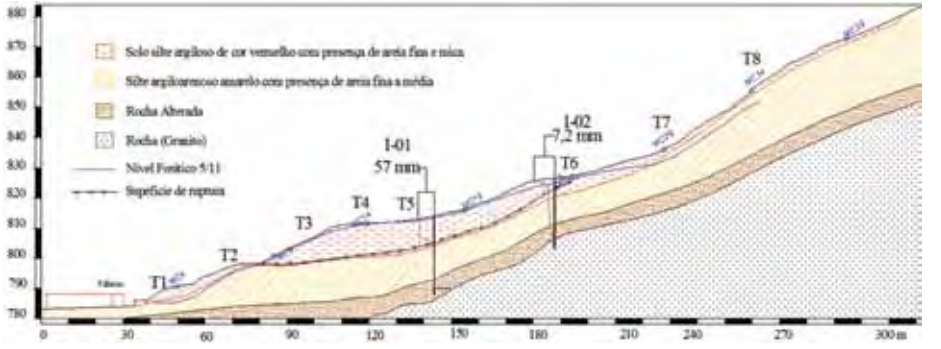


Figura 30. Seção geotécnica com a posição do nível piezométrico e a locação da superfície de escorregamento (GODÓIS *et al.,* 2009).

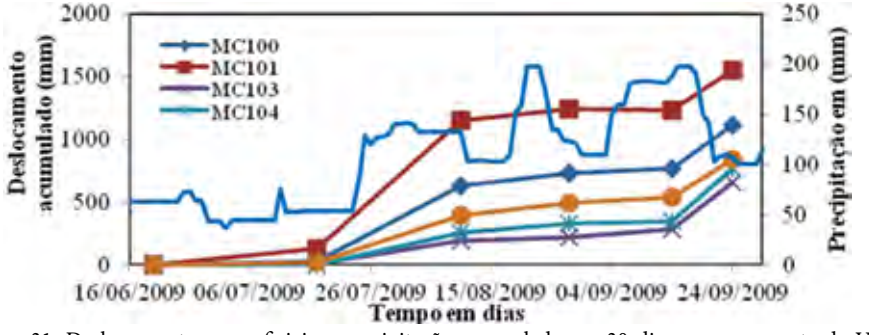


Figura 31. Deslocamentos superficiais e precipitação acumulada em 30 dias para a encosta da Vila Albertina (GODÓIS, 2011).

5 Análises dos casos apresentados e conclusões

Os depósitos de massas coluvionares instáveis em solos tropicais apresentam várias características em comum, como pode ser visto na Tabela 1. Nela estão compiladas informações de alguns casos, alguns dos quais foram apresentados, de forma resumida, no item anterior e outros foram descritos por Lacerda (2000 e 2004). Os volumes das massas instáveis são muito grandes, superiores a 100.000 m^3 e chegando a 800.000 m^3 (Angra dos Reis) nos casos estudados. A superfície de deslizamento ocorre no solo coluvionar e, muitas vezes, no contato entre este e o solo residual com uma forma alongada, semelhante a uma língua. A área de projeção em planta englobam grandes áreas, porque a espessura é pequena (entre 10 m e 30 m) quando comparada com o comprimento (150 m a 450 m). A inclinação é baixa, normalmente entre 13º e 20º, exceto no caso da casa de força de Cubatão, cuja inclinação era de 26º.

Devido aos grandes deslocamentos, a resistência está próxima à condição residual. Esses grandes deslocamentos geram uma massa deformada, com muitas fissuras, sobretudo na região da crista da encosta. As fissuras geram canais preferenciais de fluxo e aumentam a infiltração.

O nível freático é elevado e, quando atinge cotas superiores à metade da profundidade de deslizamento, ocorrem deslocamentos. A infiltração da água da chuva (e outra fontes, quando houver) é a principal fonte de alimentação do nível freático e causa das movimentações. A área de recarga desses depósitos coluvionares são grandes e complexos. Pode tanto o nível freático ser alimentado diretamente pela infiltração nas imediações da área instável, quanto haver contribuições sub-superficiais, tais como de fraturas de rochas ou camadas mais drenantes. Além disso, como mostrou Lacerda (1997), pode haver barramentos de água decorrentes de diques de materiais menos permeáveis. Por isso tudo, a contribuição da infiltração nos deslocamentos é melhor explicada por chuvas acumuladas. Nos casos apresentados, as precipitações acumuladas de 25 dias são as mais coerentes, como já havia mostrado Lacerda (1997, 2000 e 2004). Quando as chuvas acumuladas ultrapassam determinados valores limites, ocorre a aceleração dos movimentos. Nos casos estudados, a menor taxa foi na Vila Albertina (150 mm em 30 dias) e a maior no Morro dos Urubus (350 mm em 25 dias).

Tabela 1. Geometria das massas coluviais típicas do sudeste brasileiro (modificado de LACERDA, 2000).

Local	Referência	Dimensões (m)	β (graus)	Vol. aprox. (10^3 m^3)	Observações
Casa de força de Cubatão, SP	Terzaghi (1960) Vargas (1997)	H=120, L=250, d=150, h=20	26	500	Movimento acelerado por escavação no pé do talude h_w/h= 0,95
Costa 500 Via Anchieta,SP	Teixeira e Kanji (1970) Vargas (1997)	H=60, L=230, h=30	15	–	$h_w/h \approx 1$, $\varphi' = 29^o$
Angra dos Reis, RJ	Borda Gomes (1996) Lacerda (1997)	H=140, d=120, h=20	17	800	Escavação no pé do colúvio acelerou os movimentos, $\varphi_r' = 17^o$ h_w/h= 0,65; Chuva acumulada crítica de 200mm/25dias
Morro dos Urubus, RJ	Moreira (1974) Lacerda (2000)	H=50, L=220, d=120, h=14	17	450	23º abaixo da escavação rochosa, 8º no pé do escorregamento; $\varphi_r' = 30^o$ $h_w/h > 1$, Chuva acumulada crítica de 350mm/25dias
Itacuruçá, RJ	Freitas (2004), Lacerda (2004)	H=60 L=265, d=100, h=20	16		h_w/h=0,75, $\varphi_r' = 19^o$, Chuva acumulada crítica de 250mm/25dias
Morretes, PR	Suzuki (2004)	H= L=450, d=120, h=15	13	650	h_w/h=0,6, $\varphi_r' = 21^o$ Chuva acumulada crítica de 300mm/25dias
Vila Albertina, SP	Godóis *et al.* (2009) Futai *et al.* (2011-b)	H=100 L=150, d=100, h=15	13	180	h_w/h=1,0; $\varphi_r' = 28^o$ Chuva acumulada crítica de 150mm/30dias

Sendo H a altura da encosta, L o comprimento, d a largura, h a espessura da massa instável, β a inclinação média da encosta, hw a altura do nível freático em relação à superfície de deslizamento.

Os escorregamentos ativo e sazonal das massas coluvionares saturadas se deslocam lentamente, mas podem se mover vários metros ao longo dos anos. Apesar de não causarem escorregamentos catastróficos, as massa coluvinares saturadas podem causar prejuízos em obras lineares (estradas, ferrovias, viadutos, túneis, dutovias, linhas de transmissão, etc.) e construções sobre as massas instáveis. As intervenções do homem por meio de cortes, sobrecargas, aumento da taxa de infiltração de águas servidas ou de vazamentos de tubulações podem acelerar os movimentos e até modificar o tipo de escorregamento.

Como o mecanismo que deflagra o movimento é a elevação do nível freático promovido pela infiltração acumulada da água, a forma mais eficiente de estabilizar os colúvios saturados é por meio de drenagens superficiais e profundas associadas com contenções localizadas.

Referências bibliográficas

AVELAR, A. (1996). Investigação histórica e geotécnica do movimento de massa do Soberbo, RJ. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 122p

BARATA, F. E. (1969). Landslides in the tropical region of Rio de Janeiro. *In*: 7th Proceedings of International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering, México, ISSMGE … v. 2, p. 507-516.

BORDA GOMES, D. M. (1996). Correlações entre precipitações, movimentos, piezometria e fatores de segurança em encostas coluvionares em regiões tropicais. Rio de Janeiro: UFRJ. 187 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRUGGER, P. J.; EHRLICH, M.; LACERDA, W. A. (1994). Monitoração de encostas e análise de movimentações em função da precipitação pluviométrica. *In*: X Congresso Brasileiro de Mecanica dos Solos e Engenharia de Fundações 10, Foz do Iguaçu, v. 3, p. 897-904.

D'APPOLONIA, E. D.; ALPERSTEIN, R.; D'APPOLONIA, D. J. (1967). Behavior of colluvial slope. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, v. 93, n. SM4, p. 447-473.

FREITAS, N. C. (2004). Estudos dos movimentos de um colúvio no Sudeste Brasileiro. Rio de Janeiro: UFRJ. 106p fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FUTAI, M. et al. (2009). Estudo de movimento de massa em Vila Albertina-SP: monitoramento, solução e desempenho. Relatório 4 – Atividades realizadas em janeiro e fevereiro. São Paulo, EPUSP.

FUTAI, M. M.; SUZUKI, S. (2008). Infiltração de água em depósitos de solos coluvionares. *In*: XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Buzios, vol. 2, 241-248.

FUTAI, M. M. (2002). Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não-saturados: aplicação a um caso de voçorocamento. Rio de Janeiro: UFRJ. 559p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FUTAI, M. M. et al. (2011b). Estudo de movimento de massa em Vila Albertina-SP: monitoramento, solução e desempenho. Relatório final. EPUSP, São Paulo.

GODOIS, J. V.; ITO, W.; SANCHES, M.; FUTAI, M. M. (2009). Um caso de escorregamento ativo na Serra da Cantareira-SP. *In*: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas São Paulo. v. 2, p. 139-148.

GODOIS, J. V. (2011). Estudo do comportamento de um escorregamento ativo na Serra da Cantareira-SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola Politénica da USP, São Paulo.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1976). Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blucher.

LACERDA, W. A. (1966). Discussão sobre o tema: empuxos de terra. *In*: III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações Belo Horizonte. v. 3, p. 223-225.

LACERDA, W. A. (2000). Previsão e desempenho x comportamento real de taludes, previsão de desempenho x comportamento real. ABMS, Núcleo Regional de São Paulo. p.45-52.

LACERDA, W. A. (2002). Comportamento geotécnico de massas coluvionares. Geosul. Anais do III Simpósio de Prática da Engenharia Geotécnica da Região Sul, Joenvile, 219-231.

LACERDA, W. A. (2004). The behavior of colluvial slopes in a tropical environmental. International Symp. On Lanslides, Rio de Janeiro, v. 2, p. 1315-1342.

LACERDA, W. A.; LOPES, F.R. (1992). Características geotécnicas de um perfil de alteração na crista de uma encosta gnáissica do Maciço do Corcovado, RJ. *In*: I Conferência Brasileiro sobre Estabilidade de EncostasRio de Janeiro. p. 433-443.

LACERDA, W. A. (1997). Stability of natural slopes along the tropical coast of Brazil. *In*: Proc. of the Int. Symp. On Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Rio de Janeiro: Ed. Almeida. p.17-40,.

MOREIRA, J. E. (1974). Estabilidade de taludes de solos residuais de granito e gnaisse. Rio de Janeiro: UFRJ. 86fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SUZUKI, S. (2004). Propriedades geomecânicas de alguns solos residuais e coluviais do oleoduto Curitiba-Paranaguá. Rio de Janeiro: UFRJ. 346 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, A. H.; KANJI, M. A. (1970). Estabilização do escorregamento da encosta da Serra do Mar na área da cota 500 da Via Anchieta. *In:* IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro. ABMS v. 1, tema 1, p. 33-53.

TERZAGHI, K. (1960). From theory to practice in soil mechanics. New York: John Wiley & Sons. p. 241-243.

VARGAS, M. (1966). Estabilização de taludes em encostas de gnaisses decompostos. *In*:III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, , Belo Horizonte. ABMS v. 1, tema 6, p. 34-37.

VARGAS, M. (1997). History of landslides occurrences in Southern Central Brazil. II Pan--Americam Symposium on Landslides , v. 3, p. 3-39

WOLLE, C. M. (1988). Mecanismos de instabilização de encosta na Serra do Mar. *In*: ENCONTRO TÉCNICO – ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, São Paulo. ABMS. p.16-36.

Capítulo 27
Colapso do solo devido à inundação: um estudo de caso

Silvio Romero de Melo Ferreira
Eduarda Queiroz Motta
Herculano Carlos de Mendonça Neto

1 Introdução

O colapso de um solo pode ser causado pela mudança do estado tensional (tensão vertical, estrutura e sucção) e pela interação físico-química entre o fluido percolante e o solo. Na convenção anual da American Society of Civil Engeneers (ASCE), em 1976, na Filadélfia, definiu-se solo colapsível ou metaestável como o "solo não saturado (por água) que experimenta um rearranjo radical de partículas e grande redução de volume quando inundado com ou sem carga adicional" como descrevem Clemente e Finbarr (1981). O fenômeno do colapso tem acarretado vários danos em obras de engenharia, como trincas, fissuras ou mesmo rupturas de casas, edifícios, reservatórios e canais, depressões em pavimentos rodoviários e aterros. Muitos casos de colapso têm sido associados a vazamentos oriundos das redes de esgotos e de abastecimento de água, ou a vazamentos de sistema de armazenamento de combustíveis e efluentes químicos.

Em Pernambuco, na cidade de Petrolina, por ocasião da construção do conjunto Habitacional Massangana, em 1981, constituído de 1200 casas, constatou-se a ocorrência de colapsibilidade nos solos de fundações das casas, responsáveis pelo aparecimento de fissuras, trincas e rachaduras em mais de 600 casas (ARAGÃO e MELO 1982). Durante o reassentamento de Itaparica, nas cidades de Petrolândia-PE e Rodelas-BA (1985-1987), várias edificações, incluindo casas, igreja, edifícios públicos, etc., apresentaram problemas de fissuras e trincas (FERREIRA, 1995). Em Rodelas-BA, 15% das 5043 casas construídas apresentaram problemas de rachadura. No interior de São Paulo, foram detectados vários casos de acidentes em solos colapsíveis (COLLARES e VILAR, 1998; LOBO *et al*.,2004). Em Brasília-DF, casos de ocorrência de solos colapsíveis foram descritos por Camapum de Carvalho *et al.* (1987), e ocorrências de solos colapsíveis em vários outros estados brasileiros foram apresentados por Ferreira (2008).

Vários fatores influenciam a variação de volume dos solos devido à inundação, relacionados ao estado de tensão, estrutura, sucção, vazão de inundação, velocidade de deformação de colapso e o tipo de percolante. Este capítulo tem por objetivo analisar a influência de alguns desses fatores quanto à variação de volume e ao potencial de colapso de solo. Para esta análise de caso, é considerado um solo colapsível de Petrolândia-PE.

2 Caracterização geotécnica do solo

O solo analisado se constitui de areia do Município de Petrolândia, em Pernambuco, localizado a 520 km da cidade do Recife. Segundo Ferreira (1995), o perfil do solo se apresenta pouco evoluído, seja pela grande resistência ao intemperismo do material de origem (arenito), seja pelo tempo de exposição (Quaternário) ou devido ao clima da região (árido com chuvas escassas e irregulares) que promove um intemperismo lento ou muito lento.

O solo é, essencialmente, quartzoso (98%), profundo, com espessura de 5,5 m, onde são identificados dois horizontes: o horizonte A, de espessura 0,10 m, e o horizonte C, com 5,40 m (Figura 1). O solo tem capacidade de troca catiônica baixa, é distrófico (pouca fertilidade e sem reservas nutrientes), e no horizonte C o solo é álico. É da classe pedológica do Neossolo Quartzênico, com horizonte A, fraco, textura arenosa, fase caatinga hiperxerófila e relevo plano. Os argilos minerais encontrados na fração argila do solo são caulinita e interestratificação irregulares de mica, montmorilonita e clorita-vermiculita (MOTTA e FERREIRA, 2011).

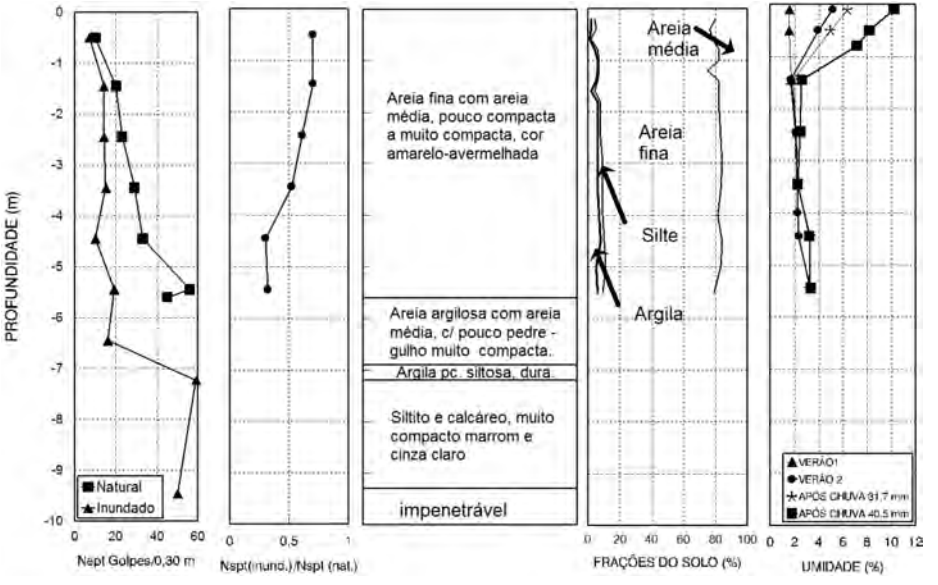


Figura 1. Perfil geotécnico do solo colapsível de Petrolândia-PE (FERREIRA, 2008).

Dois tipos de sondagens de simples reconhecimento com determinação do Índice de Resistência a Penetração (N_{SPT}) foram realizados. A sondagem Tipo A foi realizada sem circulação de água, e a do Tipo B, próxima à primeira, com o solo inundado previamente. O perfil solo obtido da sondagem Tipo A (Figura 1) é constituído de uma camada de areia fina, com pouca areia média, de cor amarela, com compacidade variando de pouco a muito compacta. Na profundidade de 5,50 m, há uma camada de alta resistência com 45 golpes para 0,10 m. Não foi observado o nível d'água. O valor do N_{SPT} variou de 10 golpes em 0,35 m a 56 golpes em 5,30 m. Há um acréscimo, aproximadamente linear, do N_{SPT} com a profundidade. Na sondagem tipo B, até a profundidade de 5,60 m, o perfil do solo é o mesmo da sondagem Tipo

A. Os valores do N_{SPT} cresceram de 7 golpes na profundidade de 0,35 m para 19 golpes na profundidade de 5,30 m. Há uma redução nos valores do N_{SPT} devido à inundação variando de 30% nas profundidades mais superficiais a 70% no fim da camada. Isso ocorre devido à diminuição da sucção causada pelo aumento do teor de umidade.

O comportamento de variação de volume do solo submetido a uma tensão quando a umidade aumenta, devido à infiltração, é apresentado de forma integrada na Figura 2, relacionando a distribuição dos grãos do solo com o estado de compacidade e microestrutura antes e após o colapso. A areia de Petrolândia-PE analisada é constituída com porcentagem de areia superior a 87% e porcentagem de argila inferior a 8%, não líquida e não plástica. Apresenta um teor de umidade inicial de 1,70%, grau de saturação de 7,61%, índice de vazios de 0,590, peso específico natural de 16,25 KN/m^3 e uma sucção inicial de 10 MPa. Essas condições iniciais são representadas na Figura 2, com indicação do algarismo 1.

No seu estado natural inicial, a matriz do solo é constituída por intensa quantidade de grãos de areia e pouca argila. Os grãos de areia são quase totalmente de quartzo, sendo de tamanhos variados e formas arredondadas e angulares. A pequena quantidade de argila reveste total ou parcialmente os grãos do esqueleto (areia), quase sempre não se estendendo ou formando pontes entre eles. A espessura do revestimento varia de 5 a 40 μm. Esse tipo de estrutura condiciona a formação predominante de um tipo de porosidade designada por poros do empacotamento simples, ou seja, espaços vazios que resultam da junção de partículas de diferentes tamanhos e formas. Alguns poucos canais foram observados. Na lâmina há 50% de grãos, 39% de poros e 11% de argilas. O revestimento dos grãos do esqueleto é atribuído a processo de iluviação, intemperismo em campo ou movimentações de natureza fisicogênica. Em todos os casos a natureza da argila é marcada pela organização paralela, uniforme e contínua de suas partículas (Figura 2).

Ao ser comprimido, a umidade constante, até a tensão vertical de 320 kPa, o solo comprimiu 2,26%, encontrando-se com índice de vazios de 0,538, grau de saturação de 8,63% e peso específico aparente seco de 17,40 KN/m^3. Essas condições são verificadas no solo antes de ser inundado e são representadas na Figura 2 com a indicação do algarismo 2.

Ao ser inundado, o solo colapsou, atingindo a deformação de 6,20%. Sob essa condição, o solo saturou, a umidade atingiu 16,62% e o peso específico aparente seco de 18,66 KN/m^3 correspondente a um grau de compactação de 95,69%. Essas condições após o processo de colapso são representadas na Figura 2 com a indicação do algarismo 3.

Após o processo de colapso ter sido concluído, o solo foi dessecado sob a tensão de 320 kPa e descarregado à tensão zero com 0,30% de aumento de variação de volume. O solo foi preparado

para ser observada a sua estrutura em microscópio ótico. Após colapso, a estrutura é semelhante à da amostra indeformada do solo natural. Há, entretanto, um empacotamento mais denso entre os grãos, causado pela aplicação da tensão e do colapso. A microestrutura do solo após colapso ainda é instável e os grãos de areia encontram-se revestidos com argila iluvial, porém com menor espessura do que na amostra indeformada (< 15 μm). A percolação da água provoca um carreamento das partículas de argilas que passam a preencher os vazios presentes na amostra indeformada. A percentagem de grãos permanece 50% e a de argilas cresce para 18%.

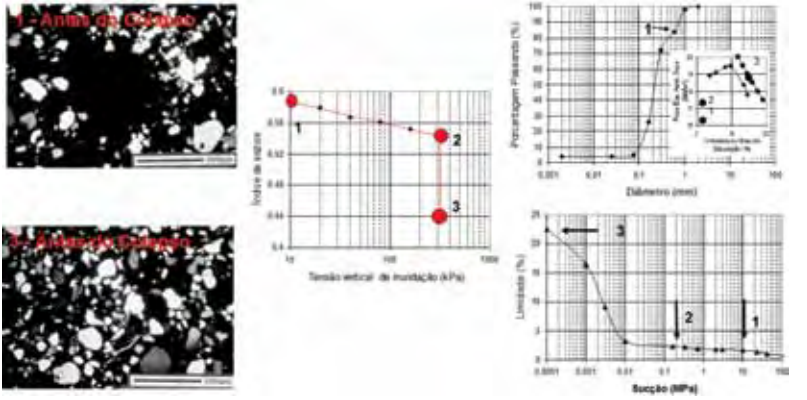


Figura 2. Variação do potencial de expansão e colapso associados à tensão de expansão, índice de vazios crítico e grau de saturação crítica.

3 Influência da vazão de inundação

O umedecimento do perfil de um solo depende de fatores externos, como precipitação, periodicidade, evapotranspiração, relevo, vegetação, etc., e de fatores internos, como estado tensional, permeabilidade, macro e microfissuras, espessura de camada ativa, etc.

A velocidade com que a água penetra nos vazios do solo tem influência na sua desintegração estrutural, podendo ser menor, maior ou igual à velocidade de destruição das ligações entre as partículas, estando relacionada, entre outros fatores, à afinidade da superfície interna do solo pela água (permeante) e à intensidade da força de coesão que mantém as partículas agregadas.

Nos ensaios edométricos simples ou duplos, costuma-se fazer a inundação de forma rápida (brusca), enquanto nos ensaios edométricos de sucção controlada, o umedecimento é lento, porque depende da permeabilidade da pedra porosa de alta resistência de ar ou da membrana de celulose, que normalmente apresenta baixa permeabilidade. Houston *et al.* (1988) fizeram a inundação dos corpos-de-prova de forma parcial, injetando 10 g de água no topo da pedra porosa e registrando a compressão resultante a cada intervalo de tempo. Colapsos progressivos crescem com o acréscimo do grau de saturação da amostra devido à adição progressiva do fluido permeante. A água foi adicionada, até ao ponto em que não resultasse mais colapso. Cruz *et al.* (1994) realizaram um ensaio edométrico simples em amostra compactada, com baixa umidade e porosidade semelhante à do solo natural, que, após consolidada até 80 kPa, foi umedecida por percolação de vapor d'água por tempos variáveis. Observaram um colapso progressivo com o aumento do teor de umidade, estabilizando-se no momento em que os colapsos atingem a curva de compressão do solo inundado (previamente).

A influência da vazão de inundação na colapsibilidade do solo de Petrolândia-PE foi analisada realizando-se ensaios edométricos simples e de sucção controlada. Nos ensaios edométricos simples, a inundação foi realizada com diferentes vazões médias de inundação que variaram de 1,0 a 0,0175 ml/s e o solo foi submetido às tensões verticais de inundação de 80, 160 e 320 kPa. Para uma mesma tensão de vertical de consolidação, o potencial de colapso

(CP) cresce com a redução da vazão de inundação (exceto em dois dos 15 ensaios apresentados), conforme Figura 3. O acréscimo máximo observado foi de 40%, na tensão de 80 kPa, quando a vazão decresceu de 1,0 ml/s para 0,0175 ml/s.

Nos ensaios edométricos convencionais, quando o solo foi inundado com a vazão de 1,0 ml/s, as deformações de colapso ocorreram rapidamente e praticamente todo o processo de deformação se estabilizou em dois minutos. Para menores vazões de inundação, as deformações de colapso ocorreram ainda de forma rápida; porém, o tempo para que a estabilização das deformações ocorresse cresceu, atingindo 30 minutos para a vazão de inundação de 0,0175 ml/s (Figura 3).

Nos ensaios edométricos com sucção controlada, a vazão de inundação foi muito lenta porque depende da permeabilidade da membrana semipermeável utilizada. Os colapsos não foram bruscos e o tempo para que a estabilização das deformações de colapso ocorressem cresceram, atingindo 2000 minutos. A curva deformação-tempo (tempo em escala logarítmica) torna-se semelhante, em forma, à do adensamento de uma argila mole saturada (Figura 3).

A inundação brusca em solos potencialmente colapsíveis arenosos causa uma redução brusca na sucção e um rápido rearranjo das partículas, resultando numa estrutura mais estável, que é função da tensão vertical de consolidação. À medida que a vazão de inundação é mais lenta, o colapso do solo é gradual, com menor velocidade de deformação, porém com maior tempo de ocorrência. Há maior rearranjo das partículas e maior tempo para ocorrer eluviação no solo, causando colapso maior. Há, entretanto, um valor limite (inferior) da vazão de inundação para a qual os potenciais de colapso não crescem mais com a redução da vazão. A vazão de inundação de 1,0 ml/s é a mais próxima das utilizadas em ensaios convencionais (célula inundada bruscamente) e corresponde aos menores valores dos potenciais de colapso aqui encontrados.

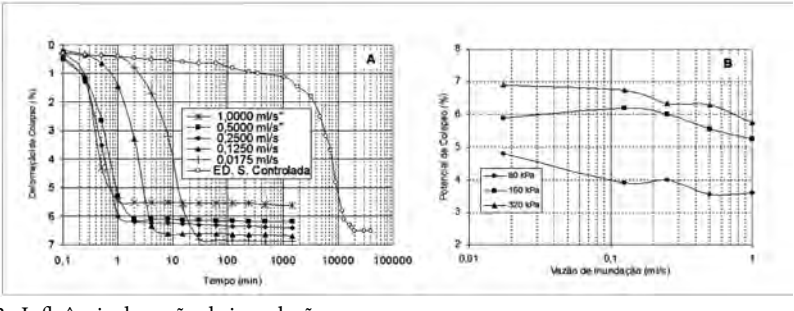


Figura 3. Influência da vazão de inundação.

A velocidade de deformação tem sido utilizada para classificar os movimentos de um talude (VARENS, 1978) e para avaliar danos em estruturas (HUNGRI, 1981). Varnes (1978) classifica os movimentos de taludes em função da velocidade de deformação como extremamente lentos a extremamente rápidos. Hungri (1981), por outro lado, com base nos casos históricos, estabeleceu uma classificação dos movimentos de estruturas em seis categorias (classes), de acordo com os danos nas estruturas e com o modo como as pessoas poderão responder aos movimentos.

As velocidades de deformação (Equação 1) máxima de colapso encontradas no solo colapsível de Petrolândia-PE, considerando a classificação de Varnes (1978), foram classificadas

em lenta, moderada e rápida, variável em função da vazão e tensão de inundação (Figura 4). Para as duas maiores vazões de inundação (1,0 e 0,50 ml/s), a velocidade de deformação máxima foi rápida, exceto para a tensão de 80 kPa e vazão de 0,5 ml/s, que foi moderada. Para todas as demais vazões, a velocidade foi moderada, exceto para a vazão de inundação de 0,0175 ml/s e tensão vertical de consolidação de 80 kPa, que foi classificada como lenta. Considerando a classificação de Hungri (1981), os valores das velocidades de deformação máxima de colapso foram enquadrados nas Classes 4 (estruturas insensíveis mantidas temporariamente) e 3 (apenas possibilidades de saídas de pessoas, estruturas e equipamentos).

$$V = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

em que: V é a velocidade de deformação devido à inundação; ΔH é a variação da altura do corpo-de-prova devido à inundação ocorrida no intervalo de tempo (Δt).

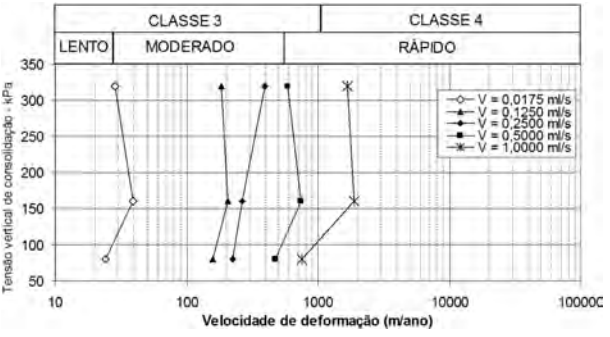


Figura 4. Velocidade de deformação máxima para diferentes vazões de inundação.

Quando as precipitações das chuvas ocorrem com menor intensidade, inicialmente, o umedecimento do solo devido à infiltração no entorno das edificações causa colapso da periferia para o centro, provocando deformações diferenciais e aparecimento de fissuras e fendas inclinadas (Figura 5a) porque a velocidade de deformação é menor. Quando as precipitações das chuvas ocorrem com maior intensidade, concentradas em curto período de tempo, em solos arenosos, o umedecimento do solo é rápido, causando colapso em toda a área edificada. Praticamente não há diferença das deformações da periferia em relação ao centro, provocando deformações de colapso quase uniformes. Embora ocorra o aparecimento de fissuras e fendas inclinadas, estas são de menores intensidades quando comparadas com as fendas horizontais que aparecem no contato do embasamento com a superestrutura e em alguns casos nas alturas das janelas (Figura 5b).

a) Fissuras causadas por deformações de colapso diferenciais

b) Fissuras causadas por deformações de colapso uniforme

Figura 5. Danos nas edificações causados (a) por colapso devido à inundação por chuvas distribuídas e (b) por chuvas concentradas em curtos períodos de tempo.

3.1 Comportamento reológico

O comportamento reológico do processo de colapso é definido de forma diferente por diversos autores. Browzin (1981), estudando solos loesses em edômetros convencionais, em que as amostras dos solos foram inundadas bruscamente, dividiu o comportamento reológico de colapso em dois processos. O primeiro inicia com o aumento do grau de saturação que causa rápidas deformações devido à quebra dos contatos entre as partículas, tem acréscimo da taxa de deformação e termina quando essa taxa atinge um valor máximo (pico), que ocorre entre 0,5 a 9,0 minutos do início das deformações. O segundo processo é caracterizado pelo decréscimo da velocidade de deformação, expulsão da água dos poros durante a consolidação pós-colapso-subsidência.

Popescu (1986) estudou *loess* e argila expansiva da Romênia e dividiu o comportamento reológico em dois processos distintos diferentes do descrito por Browzin (1981). Durante o primeiro processo, ocorre o decréscimo na velocidade de deformação com o tempo a qual, consequentemente, em acordo com a teoria de "creep", é caracterizada como um estágio instável de colapso e expansão. No segundo processo em que ocorre velocidade de deformação constante, é caracterizado por um estágio estável de colapso e expansão. O tempo para o início do segundo estágio no colapso é muito menor do que no processo de expansão. Assim, Popescu (1986) não considerou o primeiro processo observado por Browzin (1981).

No solo colapsível de Petrolândia-PE, a variação da velocidade de deformação (Equação 1) com o tempo médio é caracterizada por três estágios (Figura 6). No primeiro, a velocidade de deformação cresce; no segundo, a velocidade de deformação é constante em um ou dois níveis, e no terceiro, a velocidade de deformação cresce com o tempo. Esse comportamento é um pouco diferente do encontrado por Browzin (1981). A diferença básica está no segundo estágio. Browzim (1981) não observa que a velocidade de deformação é constante em determinados intervalos de tempo. A diferença se deve a dois fatores: i) ao maior número de leituras realizadas com menores intervalos de tempo caracterizando melhor a curva; ii) a forma de inundar o solo: com controle da vazão de inundação (0,25 ml/s) realizada por Ferreira (1995) e de forma brusca realizada por Browzin (1981).

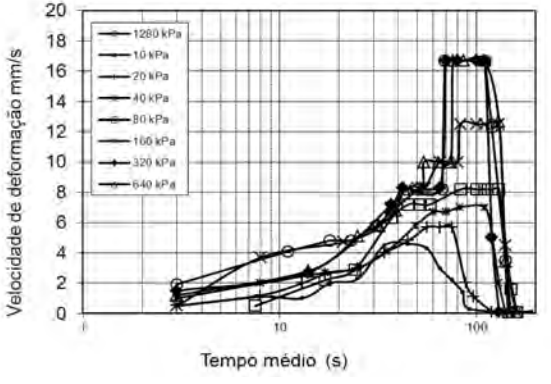


Figura 6. Comportamento reológico – velocidade de deformação de colapso com o tempo para vazão de inundação 0,25 ml/s.

3.2 Relação entre a umidade do solo e o processo de colapso

A umidade do solo em que o processo de colapso se inicia depende de vários fatores. Ferreira (1995) realizou ensaios edométricos simples no solo de Petrolândia-PE, inundado com vazão de inundação constante de 0,25 ml/s sob diferentes tensões, buscando determinar a umidade e o grau de saturação do solo em quatro condições distintas: no início do ensaio, no início de colapso, próximo ao final do processo de colapso e no final de ensaio. Os resultados são apresentados na Figura 7.

A umidade do solo e o grau de saturação iniciais de todos os corpos-de-prova são praticamente constantes, apresentando valores médios de 1,70% e 7,71%, respectivamente.

As umidades do solo no início do colapso foram determinadas encerrando o ensaio a 6 segundos após o início do processo de colapso. As umidades não eram uniformes em todo o corpo-de-prova. Na parte inferior (próxima à base), a umidade chegava a ser maior em duas ou três vezes do que no topo. Os valores colocados na Figura 7 são os médios. As umidades e os graus de saturação médios críticos para o início de colapso são maiores, em mais de duas vezes, nas tensões verticais de inundação de 10 e 20 kPa do que em tensões superiores.

As umidades do solo consideradas como final de colapso foram aquelas do início do processo de estabilização (após ocorrer 4 minutos do processo de colapso e cerca de 98% do total das deformações). As umidades decrescem com o acréscimo das tensões, variando de 19,30%, na tensão de 10 kPa, a 13,65% na tensão de 1280 kPa). O grau de saturação no final do colapso é praticamente constante e assume um valor médio de 90,61%.

As umidades finais dos ensaios, após 24 horas do início do processo de inundação, decrescem também com o acréscimo da tensão. No final do ensaio, os corpos-de-prova estão saturados.

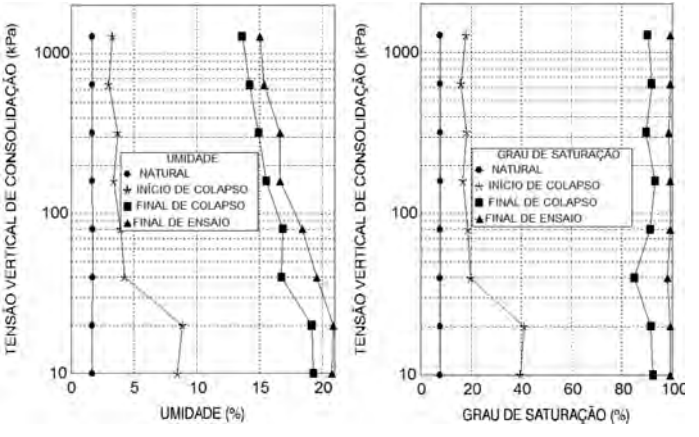


Figura 7. Umidade e grau de saturação na condição natural, no início e final do processo de colapso e no final do ensaio.

A umidade do solo em que o processo de colapso se inicia depende do estado de tensão em que se encontra. Para menores tensões verticais de consolidações e, consequentemente, menores deformações antes da inundação, as umidades de início do processo de colapso são maiores do que para tensões maiores. Assim, nesse caso, quando um solo arenoso está subme-

tido a uma tensão mais baixa, a quantidade de água (precipitação pluviométrica) que precisa infiltrar para que o processo de colapso comece a ocorrer é maior do que se o solo estiver submetido à tensão maior.

4 Influência do tipo de permeante

As trincas e fissuras em alvenaria e nas estrutura de edificações provenientes de colapso do solo são provocadas pela percolação de água das chuvas ou da rede de abastecimento de águas servidas, pela elevação do nível d'água ou pela percolação de líquidos contaminantes, associada ao acréscimo ou não de sobrecarga. Há vários casos de acidentes em solos colapsíveis associados ao rompimento de canaletas e vazamentos de diversas origens, com tanques de tratamento de efluente, dutos de transportes de soluções para processos industriais e outras substâncias (COLLARES e VILAR, 1998).

Lobo *et al.* (2004) relatam vários acidentes que ocorreram no interior de São Paulo. Uma indústria de sucos de laranja teve sua câmara frigorífica totalmente comprometida devido a recalques do piso. Esses recalques foram causados pela infiltração de água sob o piso da câmara, provocando o colapso do solo. O vazamento de água em reservatório inferior de um edifício de 12 pavimentos, apoiado em tubulões a céu aberto, reduziu o atrito lateral resistente, ocasionando aumento de carga na base. A transferência de esforço para a base do tubulão causou deformações adicionais, aconteceram recalques diferenciais, provocando um pequeno desaprumo do edifício. O desaprumo ficou evidenciado pelo aumento da abertura das juntas de dilatação do edifício. As aberturas resultaram maiores no topo do edifício e diminuíam nos pavimentos inferiores. A redução na capacidade de carga de fundações profundas pode ser causada pela elevação do lençol freático. Citam-se como exemplos casos em Brasília no Distrito Federal e Pereira Barreto em São Paulo, devido ao enchimento do lago de represa, como comentam Lobo *et al.* (2004). Em uma indústria de produção de suco de laranja, situada no interior de São Paulo, infiltração de solução contendo soda cáustica, no solo sob um evaporador, provocou o colapso com a formação de uma cratera de cerca de 8 metros cúbicos de volume. Situações semelhantes acontecem em indústrias que utilizam soda cáustica, como tecelagens, indústrias de alimentos, etc.

A influência dos permeantes na colapsibilidade de um solo de origem éolica foi analisada por Reginatto e Ferrero (1973), por meio de ensaios edométricos duplos, utilizando permeantes com propriedades físico-químicas diferentes (água potável, pH = 6,5 a 6,8; água servida proveniente de esgoto, pH = 8,5 a 9,0, e água ácida obtida pela percolação de água destilada através de solo orgânico, pH = 5,5 a 5,6) em um solo obtido de um depósito *loess* da região de Córdoba, na Argentina, com pH variando de 7,5 a 8,5 e argilo minerais (predominantemente, caulinita e montmorilonita em pequenas proporções). Os autores concluem que o colapso do solo estudado é devido à dispersão das argilas que mantêm os vínculos do solo macroporoso.

Camapum de Carvalho *et al.* (1987) verificaram que, para a argila porosa de Brasília-DF, o aumento do pH do fluido permeante tende a intensificar o colapso, sendo necessário um estudo mais aprofundado, envolvendo grau de saturação, sucção e composição do fluido que percola pelo solo.

Ignatius e Souza Pinto (1991) estudaram o comportamento de uma argila arenosa com pH = 5,5, da região de Sorocaba-SP, em presença de um efluente industrial à base de soda cáustica (pH = 13,7), com íons predominantes de sódio 68 g/l e de alumínio 36 g/l. O colapso do solo sob tensão de 53 kPa (equivalente ao peso das terras) devido à inundação com água é de 2%, e as deformações ocorrem imediatamente. Após a inundação com água, percolou-se o efluente industrial, ocorrendo um colapso adicional de 15%. Porém, não ocorreu de forma imediata, e sim ao longo do tempo, iniciando as deformações de colapso após, aproximadamente, quinze minutos do início da inundação.

Cruz *et al.* (1994) analisaram a influência do líquido permeante (óleo isolante a soluções ácidas de ácido clorídrico com pH variando de 1 a 5 e soluções básicas de hidróxido de sódio com pH variando de 8 a 13) na colapsibilidade de solos porosos coluvionares que recobrem as regiões central e oeste do Estado de São Paulo. Constataram que o solo expande sob tensão nula quando inundado com líquido com pH até 11; para pH = 13 o solo apresenta colapso da ordem de 2,5%. Sob tensão de 160 kPa, os colapsos que variaram em torno de 9,0% alteraram para 14%, quando o líquido possui pH de 13.

As propriedades do líquido em contato com o solo influenciam sua velocidade de penetração e consequentemente sua interação com o solo nos valores dos potenciais de colapso. Nos efeitos físicos, tem-se a expulsão forçada do ar aprisionado nos poros do solo, devido ao umedecimento, e à quebra de cimentações por ação mecânica de sobrecargas e/ou ação do peso próprio. Já nos efeitos químicos, tem-se a quebra de cimentações por ação química do líquido que interage com o solo, destruindo-as. Nos efeitos físico-químicos, tem-se a interação do líquido com a superfície dos minerais do solo, ocorrendo: a hidratação da superfície com a ação de uma força repulsiva devido ao potencial de solvatação, ou afinidade de interação; o desenvolvimento da dupla camada elétrica e consequente mudança de volume (MARIZ, 1993).

O conhecimento das propriedades dos líquidos é fundamental para a análise da interação solo-líquido. A tensão superficial é a relação entre a força e a área que atua na superfície livre de qualquer líquido, como resultado da atração entre as moléculas. A molhabilidade, que consiste no espalhamento de um fluido sobre superfícies sólidas, sofre influência da tensão superficial. Quanto maior a tensão superficial, menor a molhabilidade e o potencial para o líquido penetrar nos poros.

A condutividade elétrica é a capacidade que o fluido possui de conduzir corrente elétrica. O seu valor está relacionado com a presença de íons dissolvidos no fluido. A maioria dos ácidos, bases e sais inorgânicos são bons condutores, ao passo que substâncias orgânicas, que não se dissociam em solução (benzina e gasolina, por exemplo), não são condutoras.

O termo pH é usado universalmente para expressar o grau de acidez ou alcalinidade de uma solução, ou seja, é o modo de expressar a concentração de íons de hidrogênio nessa solução. As medidas do pH fornecem inúmeras informações a respeito da qualidade do fluido. Geralmente um pH muito ácido ou muito alcalino está associado à presença de despejos industriais, esgoto, etc.

Motta e Ferreira (2011) analisaram o efeito da interação do solo-líquido na compressibilidade e colapsibilidade do solo de Petrolândia-PE. Os ensaios foram realizados em amostras compactadas estaticamente com controle de qualidade, resultando corpos-de-prova com repetibilidade das condições iniciais desejadas (γ_d = 16,50 kN m^{-3} e w_c = 3,5%). Foram realizados ensaios edométricos convencionais, simples e duplos, utilizando prensas tipo Bishop e

células edométricas do tipo anel fixo. Foram utilizados para inundação dos corpos-de-prova: água destilada, solução à base de água sanitária, chorume, solução à base de detergente líquido, esgoto bruto, óleo de soja e solução à base de sabão em pó. Os valores dos Potenciais de Colapso, obtidos por meio dos ensaios edométricos simples e duplos, foram calculados, utilizando-se as Equações (2) e (3), respectivamente:

$$CP\ (\%) = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$CP\ (\%) = \frac{\Delta \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_{v(nat)}} \times 100\% \quad (3)$$

em que: CP é o potencial de colapso; ΔH é a variação da altura do corpo-de-prova, devido à inundação; H_i é a altura do corpo-de-prova antes da inundação; $\Delta\varepsilon_v = \varepsilon_{v\,(nat)} - \varepsilon_{v\,(inund)}$, $\varepsilon_{v\,(nat)}$ é a deformação volumétrica específica do solo, carregado na umidade natural; $\varepsilon_{v\,(inund)}$ é a deformação volumétrica específica do solo, carregado, previamente, inundado.

Nos ensaios edométricos duplos, a variação da deformação volumétrica específica (ε_v), com a tensão vertical de consolidação do solo compactado e com a umidade constante, foi de 4,85% (Figura 8). A deformação volumétrica específica do solo (ε_v), inundado com água destilada, foi de 10,5% no fim do carregamento, uma compressibilidade de 2,17 vezes a do solo natural, referente a um potencial de colapso de 6%. As maiores deformações volumétricas foram 12,1% e 11,3%, referentes aos potenciais de colapso 7,7% e 6,8%, verificados com o solo inundado com os líquidos de pH alcalino, as soluções à base de água sanitária e à base de sabão em pó, respectivamente. As demais deformações se apresentaram próximas às do solo inundado, com água destilada, para os líquidos de pH próximos ao neutro, enquanto o óleo de soja, de pH ácido, praticamente não gerou colapso. Nos ensaios edométricos simples, a inundação do solo, com água destilada, sob tensão de 640 kPa, provocou um potencial de colapso de 4,8%, enquanto os maiores valores de potencial de colapso foram de 6,2% e 5,7%, verificados, após a inundação do solo, com chorume e esgoto bruto, respectivamente. A Figura 9 apresenta a variação do potencial de colapso, com a tensão vertical de consolidação do solo, inundado com diferentes líquidos.

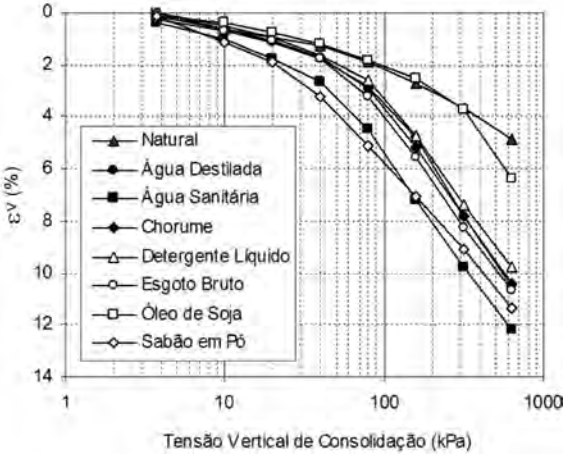


Figura 8. Curvas ε_v versus σ_v (log) - ensaios edométricos duplos.

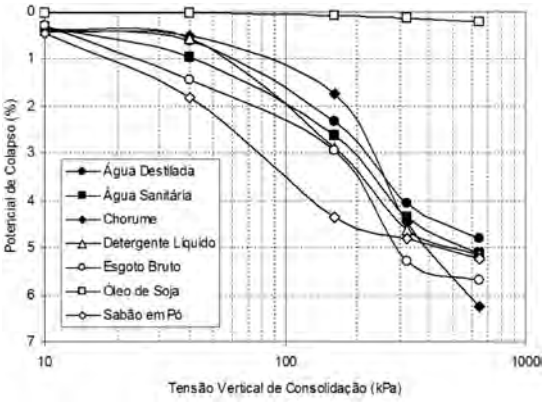


Figura 9. Curvas CP versus σ_v (log) – ensaios edométricos simples.

A influência da tensão superficial dos líquidos, utilizados para inundação do solo, foi analisada, durante a inundação, nos ensaios edométricos simples. As deformações dos solos, inundados com líquidos com menores tensões superficiais, levaram mais tempo para estabilizar (Figura 10a). O pH dos líquidos utilizados para inundação foi correlacionado com os potenciais de colapso do solo, na tensão de 160 kPa, como mostrado na Figura 10b. Observa-se a tendência a potenciais de colapso, mais altos, para líquidos com pH mais alcalinos. A condutividade elétrica dos líquidos, utilizados para inundação, influencia na mobilidade dos íons no solo. O solo apresentou potenciais de colapso mais altos, quando inundado com líquidos de maior condutividade.

Motta e Ferreira (2011), ainda, realizaram ensaios edométricos simples, no mesmo solo, porém, compactado no peso específico aparente seco máximo e na umidade ótima ($\gamma_{dmáx}$ = 19,25 kN/m^3 e wot = 8,85%), com inundação do solo após carregamento na tensão de 320kPa. Os líquidos utilizados foram os mesmos. Os valores dos Potenciais de Colapso são apresentados na Tabela 1. A inundação do solo provocou um Potencial de Colapso máximo de 0,2%, evidenciando que o solo não apresenta colapso para nenhum líquido utilizado para inundação. Nesse caso, a compactação foi fundamental para solucionar problemas de colapso do solo.

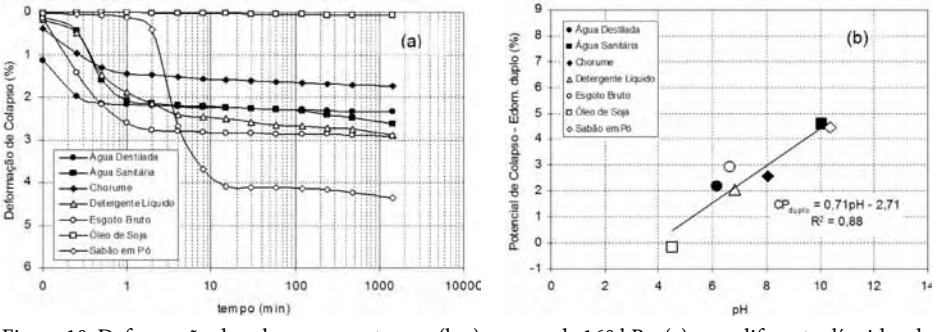


Figura 10. Deformação de colapso *versus* tempo (log) com σ_{vi} de 160 kPa, (a) com diferentes líquidos de inundação e (b) variação do potencial de colapso do solo, sob tensão de 160 kPa, com o pH dos líquidos de inundação dos ensaios edométricos duplos.

Tabela 1. Potenciais de colapso em solo de Petrolândia-PE no peso específico aparente seco máximo e umidade ótima com diferente líquidos de inundação na tensão de 320 kPa.

Potencial de Colapso (%) na tensão de 320 kPa						
Líquido de Inundação						
Água Destilada	Água Sanitánitátia	Chorume	Detergente	Esgoto Bruto	Óleo de Soja	Sabão em Pó
0,048	0,164	0,047	0,168	0,037	0,047	0,178

Motta e Ferreira (2011) mostraram que as propriedades físico-químicas dos líquidos utilizados para inundação têm influência na interação com o solo. Quanto menor a tensão superficial do líquido, maior o potencial de molhabilidade do solo. No entanto, a interação solo-líquido ocorre de forma lenta. Os líquidos de pH alcalino mostraram uma tendência a produzir Potenciais de Colapso do solo mais altos, ao passo que os líquidos com maiores condutividades apresentaram uma leve tendência a definir Potenciais de Colapso do solo mais altos. Deve-se analisar, entretanto, o conjunto de fatores que influenciam o comportamento colapso do solo, e não o atribuir apenas a um fator isolado.

5 Técnicas de melhoramento

Segundo Ferreira (2010), as soluções de engenharia com objetivo de evitar ou reduzir os efeitos da variação de volume decorrente do umedecimento de solos colapsíveis obedecem a dois princípios básicos. O primeiro tem por objetivo conferir ao solo uma estrutura estável no estado de tensão original e naquele a que será submetido, e o segundo visa impedir ou minimizar de forma significativa a variação da umidade do solo. Cada solução está condicionada ao tipo de obra, às características do solo, ao custo e ao tempo de execução. Ferreira (2008) dividiu os métodos de Engenharia de Fundações adotados frequentemente em solos colapsíveis em três grupos: i) soluções anteriores à construção, evitando o solo ou preparando a estrutura para com ele conviver; ii) soluções anteriores à construção, modificando as propriedades dos solos colapsíveis; iii) soluções posteriores à construção.

5.1 Soluções anteriores à construção sem modificação do solo

Há soluções que antecedem a construção com o intuito de evitar o contato com o solo colapsível ou preparar a estrutura para conviver com esse solo. As principais soluções são: i) retirada parcial ou total do solo colapsível com substituição por material adequado, especificando a espessura do solo a ser substituído, a partir da distribuição de tensões no terreno e da previsão da variação da profundidade até onde ocorre variação da umidade do solo (Figura 11a); ii) utilização de fundações profundas, apoiadas abaixo de extrato colapsível com consideração do efeito do atrito negativo que pode ser provocado pelo colapso da camada superior (Figura 11b); iii) emprego de fundações flutuantes (Figura 11c); iv) uso de sistema de fundação com *radier* de maior rigidez, de modo a minimizar os efeitos dos recalques diferenciais (Figura 11d).

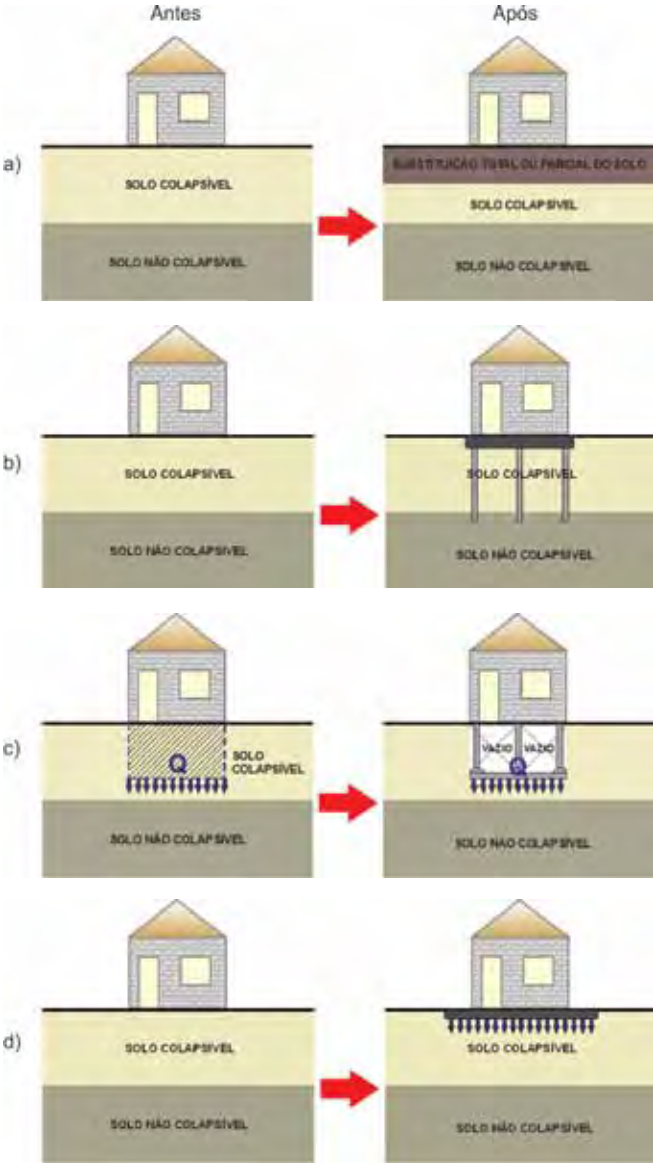


Figura 11. Soluções anteriores à construção sem modificação do solo.

5.2 Soluções anteriores à construção com modificação do solo

Soluções de engenharia que antecedem a construção utilizam técnicas que modificam as propriedades do solo colapsível. As principais são: i) promover o colapso forçado da estrutura do solo por umedecimento prévio, podendo utilizar sobrecarga para acelerar ou aumentar o efeito (Figura 12a); ii) compactar total ou parcialmente o solo colapsível, visando

reduzir a permeabilidade, aumentar a capacidade de suporte e destruir a estrutura metaestável (Figura 12b); iii) melhorar o arranjo das partículas do solo, por meio da criação de uma estrutura mais estável, conferindo ao solo maior resistência e eliminando a colapsibilidade, através da injeção de vários ligantes ou agentes químicos ou estabilização granulométrica (Figura 12c).

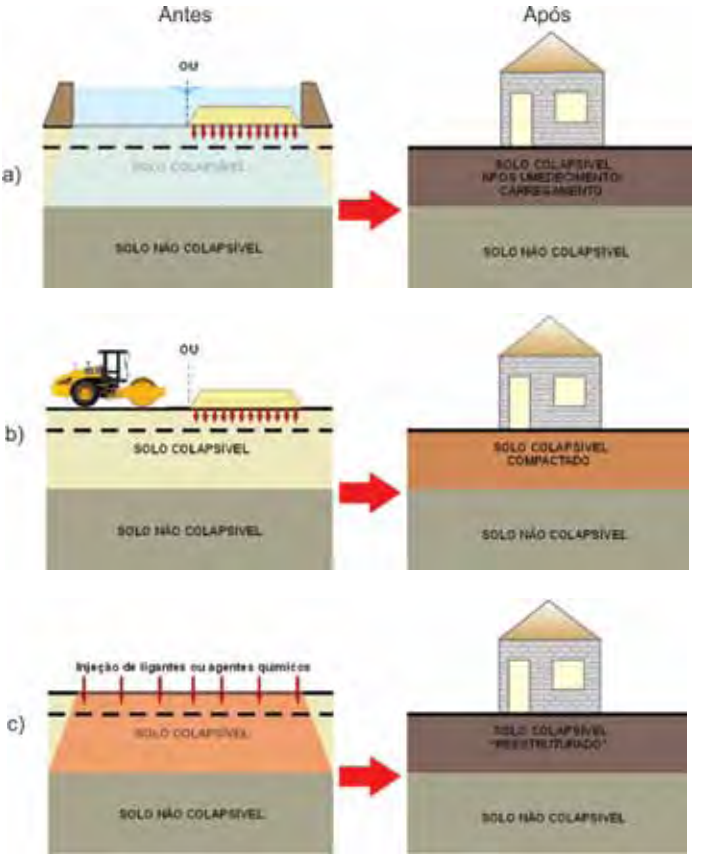


Figura 12. Soluções anteriores à construção com modificação do solo.

5.3 Soluções posteriores à construção

Nos casos em que a ocorrência de solos colapsíveis foi detectada apenas após a execução da obra com o surgimento de danos, a medida a ser tomada é minimizar os efeitos, evitando mais sobrecarga no solo e diminuindo suficientemente a infiltração da água (Figura 13a), por meio da utilização de projetos de drenagem adequados (Figura 13b), controle de vazamentos de condutos de água e esgoto (Figura 13 c) e impermeabilização da área não coberta (Figura 13b). Nesse caso, medidas corretivas ou de manutenção serão inevitáveis. No caso de fundações de edificações, pode ser feito o reforço dos elementos aumentando a peça de fundação ou utilizando-se estacas Mega.

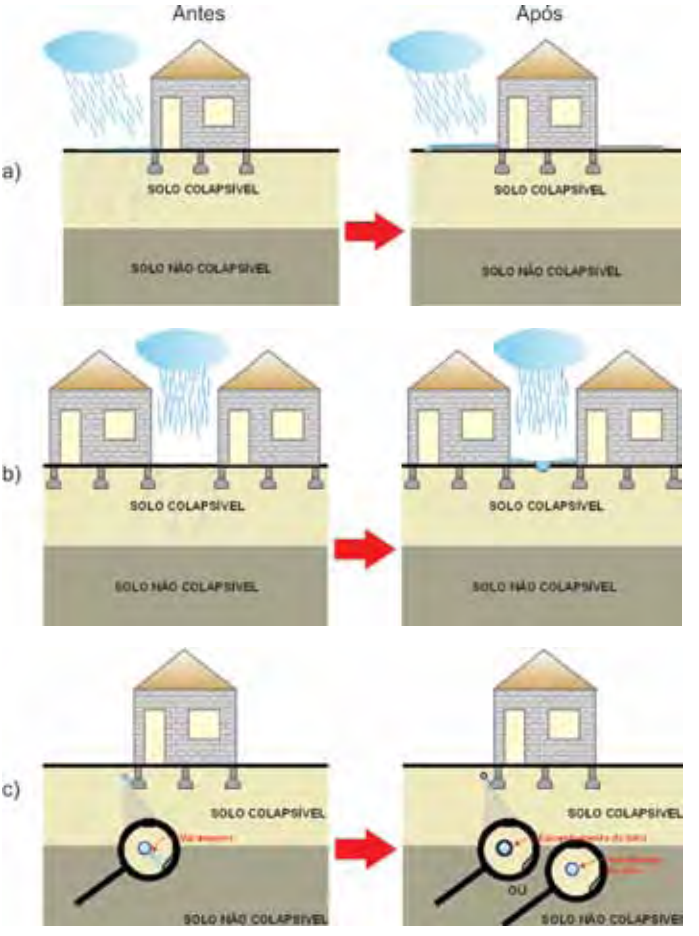


Figura 13. Soluções posteriores à construção.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro no desenvolvimento da pesquisa

Referências bibliográficas

ARAGÃO, C. J. G.; MELO, A. C. (1982). Fundações rasas em solos colapsíveis no semi-árido em Pernambuco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7., Olinda-PE. Anais…, ABMS v. 2, p. 9-40.

BROWZIN, B. S. (1981). Rheological definition on loess subsidence, Proc. X Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Estocolmo, v. 1 p. 65-68.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; NUNES, P. M.; BERBERIAM, D.; FERREIRA, E. S. (1987). Influencia del pH del líquido de saturación en la colapsabilidad. *In*: CONFERENCIA PANAMERICANA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA DE FUNDACIONES, 8, Actas... Cartagena, Colombia: Balkema v. 2, p. 1-8.

CLEMENCE, S. P.; FINBARR, A. O. (1981). Design considerations for collapsible soils. Journal of the Geotecnical Engineering Divisiom, ASCE, v. 107, n. GT3, Mar., p. 305-317.

COLLARES, A. C. Z. B.; VILAR, O. M. (1998). A influência do pH do fluido de saturação no colapso. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília/DF. Anais... Brasília: ABMS. v.1, p. 123-129.

CRUZ, P. T.; FERREIRA, R. C.; PERES, J. E. E. (1994). Análise de alguns fatores que afetam a colapsividade dos solos porosos. *In:* CONBRASEF, 10. Foz de Iguaçu-PR. Anais... ABMS. v.4, p. 1127-1134.

FERREIRA, S. R. M. (1995). Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Tese de Doutorado, 379p.

FERREIRA, S. R. M. (2008). Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6. Salvador-BA. Anais... ABMS, v.2, p. 593-619.

FERREIRA, S. R. M. (2010). Microestrutura de solos colapsíveis e técnicas de melhoramento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado-RS. Anais... ABMS, v.1, p.1-8.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N.; SPADOLA, D. J. (1988). Prediction of field collapse of soil due to wetting. Journal of Geotecnical Engineering, v. 114, n. 1, Jan., p. 40-58.

HUNGRI, O. (1981). Dinamics of rock avalanches and other types of slope movements. PhD. Thesis, University of Alberta, Edimonton.

IGNATIUS, G. S.; SOUZA PINTO, C. (1991). Comportamento de um solo em presença afluente químico a base de soda cáustica. *In:* SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, REGEO'91, Anais... ABMS v.1, p. 233-241. Rio de Janeiro.

LOBO, A. S.; FERREIRA, C. V.; RONÓFIO, A.; ALBIERO, J.H. (2004). Danos de edificações apoiadas em solos colapsíveis. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5., 2004, São Carlos-SP. Anais... ABMS, p. 83-86.

MARIZ, D. F. (1993). Um estudo físico, químico e mecânico sobre o colapso de solos residuais sesquioxídicos micro-agregados do Planalto Central. Dissertação na COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro 168 p.

MOTTA, E. Q.; FERREIRA S. R. M. (2011). Variações da compressibilidade e do potencial de colapso de um solo perante diferentes líquidos de inundação. Revista de Estudos Ambientais, v. 13, jan./jun., p. 28 -41.

POPESCU, M. E. (1986). A comparison between the behavior of swelling and of collapsing soils. Engineering Geology, v. 23, n. 2 p.145-163.

VERENS, D. J. (1978). Slope movement types and processes in landslides: analysis and control. Ed by R.L. Schuster and R.J. Krizet, Transportation Research Board, Spec. Report 176, Washington, p. 11-33.

Capítulo 28
A infiltração e os fenômenos da inundação, erosão e esqueletização do maciço

José Camapum de Carvalho
Maurício Martines Sales
Roberto Quental Coutinho

1 Introdução

Hoje, três grandes problemas retiram a tranquilidade da população em áreas de maior risco: as inundações, as erosões e as rupturas de encosta. É preciso que se diga, no entanto, que, além dessas ameaças diretas à vida e à sua qualidade, outras existem com impacto econômico de grande relevância ligadas ao fenômeno da erosão. Pode-se, neste caso, citar a desertificação de grandes áreas oriunda, dentre outros fatores, da erosão superficial e do próprio extermínio da vida no solo e sobre o solo, bem como do assoreamento de reservatórios de abastecimento de água e geração de energia. Todos esses problemas estão, de algum modo, ligados à questão da infiltração. As inundações estão relacionadas à escassez de infiltração; a esqueletização, a infiltrações inapropriadas; as erosões, aos dois fatores, falta de infiltração e infiltração inapropriada.

A erosão dos solos enquanto fenômeno natural faz parte da dinâmica do relevo e, por isso, geralmente não é preocupante. O mesmo é possível dizer quanto ao fenômeno da esqueletização geomorfologicamente intitulada eluviação. Porém, a intervenção do homem no meio ambiente sem o devido cuidado pode desencadear e acelerar processos erosivos e de esqueletização, muitas vezes imperceptíveis, em erosões superficiais, lineares ou em anfiteatro de grandes proporções ou em causas primárias de rupturas de encostas. As consequências são as mais variadas, podendo ir desde mortes até a desertificação de áreas antes agricultáveis e a destruição de moradias e sistemas de infraestrutura, como linhas de transmissão e rodovias. A Figura 1a ilustra o caso em que, na década de 80 do século XX, foram desencadeadas erosões lineares na cidade de Planaltina de Goiás. A Figura 1b revela a imagem quatro décadas depois, já no século XXI, sem que se conseguisse equacionar os problemas em sua origem. Mas o que teria faltado nesse caso? Gestão Pública? Conscientização e participação da sociedade? Incapacidade técnica para solucionar os problemas? É possível admitir que ocorreram deficiências em todos esses âmbitos, mas, mais que isso, os administradores e a sociedade não foram suficientemente educados para resolver problemas como o da década de 80 do século passado (ação reparadora), nem para evitar danos como os atuais (ação preventiva).

(a) (b)

Figura 1. Erosão na cidade de Planaltina de Goiás: a) foto de 1987; b) foto de 2011.

O educar nos temas socioambientais tem que integrar a educação formal e a educação não formal. Para que ambas sejam efetivas e apresentem resultados enquanto formadoras de uma consciência, de uma cultura, são necessárias políticas públicas consistentes. O meio acadêmico tem atuado, na medida do possível, com base no desenvolvimento técnico-científico alcançado, na elaboração de material didático na tentativa de contribuir para essa transformação da consciência socioambiental de modo a consolidá-la como um traço cultural. No entanto, de modo isolado e muitas vezes pontual, o meio acadêmico não conseguirá resolver os graves problemas socioambientais que agridem o território brasileiro de Norte a Sul, de Leste a Oeste.

Como exemplos de contribuição do meio acadêmico na direção da produção de material didático direcionado para os ensinos formal e não formal, podem ser citados cartilhas e livros. As cartilhas "Erosão" (CAMAPUM DE CARVALHO e DINIZ, 2005) e "Meio Ambiente: Erosão" (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2006), e o livro "Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro" (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006), desenvolvidos conjuntamente pela Universidade de Brasília, Universidade Federal de Goiás e Furnas, Centrais Elétricas S.A. As cartilhas "Infiltração" (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2010) e "Meio Ambiente: Infiltração" (CAMAPUM DE CARVALHO e LELIS, 2011) foram desenvolvidas pela Universidade de Brasília e Universidade Federal de Goiás. O curso de capacitação "Gestão e Mapeamento de Riscos Socioambientais" foi desenvolvido pelo Ministério das Cidades conjuntamente com a Universidade Federal de Pernambuco. Entretanto, nada disso resolve diante da ausência de Políticas Públicas efetivas, pois ocorre disjunção entre a geração do conhecimento e sua aplicação. Esta, quando ocorre, é esporádica e pontual, não conseguindo firmar-se de modo amplo como traço cultural. Aqui se está a apostar nas mudanças necessárias à popularização da ciência como meio de transformação socioambiental.

Este capítulo busca consolidar entendimentos quanto à relação entre o tema infiltração de águas pluviais e os fenômenos da inundação, da erosão de origem hídrica pluvial e da esqueletização de maciços.

2 Conceitos básicos

Ao se apresentarem conceitos, definições e nomenclatura em temas multidisciplinares como é o caso das inundações e erosões, sempre surge alguma divergência. Mas aqui se evitarão essas discussões, até porque no âmbito geral elas são quase sempre irrelevantes.

O termo inundação advém do latim *inundare*, que significa "encher de água, inundar". Aqui ele será usado significando o transbordamento das calhas de canais, córregos, rios e talvegues. Embora as inundações possam ter diferentes origens, serão aqui abordadas apenas aquelas oriundas do excesso de precipitação pluviométrica em relação às capacidades de infiltração e armazenamento. Não serão consideradas, por exemplo, aquelas que se originam da ruptura de diques e barragens, pois estes não deveriam, em princípio, romperem-se.

Os alagamentos serão vistos como uma consequência do acúmulo de água proveniente de enxurradas, impermeabilização excessiva do solo e obstrução dos sistemas de drenagem urbana, não tendo origem no fenômeno do transbordamento de calhas. Enquanto os alagamentos são geralmente fruto do próprio meio urbano, as inundações podem ter origem no meio urbano, rural ou em ambos.

As cheias e enchentes não serão abordadas neste capítulo, sendo relevante esclarecer a definição motivadora desta decisão. As cheias e enchentes são consideradas aqui como um fenômeno natural cíclico, distinguindo-se dos alagamentos e das inundações, que, por sua vez, são tidos como frutos da intervenção antrópica no meio ambiente, principalmente no que diz respeito à ocupação e ao uso do solo.

Portanto, com base nesses conceitos gerais apresentados, o capítulo abordará apenas os temas alagamentos e inundações, focalizando as questões relativas à infiltração e ao excesso de impermeabilização.

O termo erosão provém do latim (*erodere*) e significa "corroer". Nos estudos ligados às Ciências da Terra, o termo é aplicado aos processos de desgaste da superfície terrestre (solo ou rocha) pela ação da água (erosão hídrica), a qual está aqui classificada, quanto à origem, em marinha, fluvial e pluvial, do vento (erosão eólica), do gelo (erosão glacial), da neve (erosão nival), das plantas (erosão fitogênica), de animais (erosão zoogênica), do homem (erosão antrópica). Outra categoria que poderia ainda ser inserida nesse grupo é a deflagrada a partir de movimentos de massa gravitacionais oriundos de instabilizações de taludes que, geralmente, associam-se ao excessivo aumento de umidade do solo com frequente elevação do nível d'água freático, ao processo de esqueletização do maciço ou ainda a erosões internas surgidas a partir do pé da encosta. As erosões deflagradas por movimentos de massa gravitacionais podem permanecer como simples rupturas de encostas, submetendo-se apenas aos efeitos de erosões superficiais, ou evoluírem para ravinas e voçorocas. Cabe esclarecer que a erosão hídrica pluvial, no entanto, geralmente tem relação direta com o escoamento superficial e/ou de subsuperfície.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006, p. 42),

> Os processos erosivos constituem-se numa forma natural de modelagem do relevo e atuam de modo conjugado aos processos pedogenéticos. De maneira geral, sob condições naturais, estes dois processos atuam equilibradamente, havendo certa equivalência entre a quantidade de solo erodida e a quantidade produzida. Denomina-se comumente este fenômeno de erosão natural ou erosão geológica. Quando se dá o rompimento deste equilíbrio devido à interferência do homem, e não é permitida ao solo a recuperação natural, dá-se origem a erosão acelerada ou erosão antrópica.

Destaca-se que a dinâmica dos processos erosivos está intimamente ligada à própria dinâmica de variáveis causais, como clima e ocupação e uso do solo. O fato de o clima, por exemplo, estar muitas vezes relacionado a ocupação e uso do solo reflete a complexidade do tema erosão.

As erosões hídricas pluviais, quanto à forma como ocorrem, podem ser classificadas em erosão laminar ou superficial, erosão em sulcos, ravinas, voçorocas e erosão interna. Geralmente as quatro primeiras compreendem um processo evolutivo que se inicia com a erosão superficial, evolui com a concentração do fluxo para sulcos e, em seguida, formam ravinas que, ao atingirem o nível d'água, passam a ser intituladas voçorocas. A erosão interna ou *piping* ocorre, muitas vezes, associada ao processo de voçorocamento, mas pode ter origem simplesmente no fluxo concentrado de subsupefície, dando origem a subsidências sem atrelamento às voçorocas (CAMAPUM DE CARVALHO *et al*., 1999).

Dada certa polêmica existente no meio técnico-científico, convém ressaltar que hoje já se admitem como sinônimas as palavras "voçoroca" e "boçoroca". Nota-se que o dicionário Houaiss da língua portuguesa (HOUAISS e VILLAR, 2009), já de acordo com a nova ortografia, inclui, ao definir voçoroca, a grafia "bossoroca" e considera indistintamente da grafia o termo como uma sinonímia de ravina. Frisa-se que, segundo a mesma fonte, a palavra ravina tem etimologia na língua francesa (*ravine*), e a palavra voçoroca (boçoroca ou bossoroca) tem etimologia na língua tupi (*mboso'roca*, gerúndio de *mboso'rog*, que significa romper).

É necessário entender, para que se chegue à compreensão de várias rupturas de taludes de ravinas e voçorocas (LIMA, 2003), assim como de encostas, que o fenômeno erosivo não se limita à remoção de uma camada de solo ou rocha alterada na superfície do terreno. Esse fenômeno pode compreender ainda o carreamento de compostos químicos solubilizados e de partículas de solo muita finas (coloides), por meio do fluxo de água no maciço, caracterizando, assim, um processo de esqueletização (ROOSE, 1977 *apud* HENENSAL, 1986). Esse processo de esqueletização termina por comprometer a estabilidade estrutural do maciço, conduzindo em muitos casos à sua ruptura. Destaca-se que o termo esqueletização corresponde ao fenômeno pedogenético da eluviação.

Ao longo do capítulo, no que tange às erosões, serão discutidas apenas a erosão hídrica de origem pluvial e a sua relação com o processo de infiltração.

3 Características das águas pluviais e sua influência no processo de infiltração e na estabilidade estrutural do solo

A água é considerada um solvente universal e, devido a essa propriedade, atua na atmosfera dissolvendo compostos químicos e gases. Isso faz com que suas características variem de região para região, conforme o período do ano. Mas sendo um excelente solvente, a água não só leva elementos e compostos químicos para o solo, como dele os remove. Cabe lembrar que a água é também um solvente de gases e, com isso, pode atuar dependendo das condições atmosféricas geradas, por exemplo, pelo excesso de veículos a combustão em circulação, gerando chuvas ácidas, muitas vezes prejudiciais à estabilidade estrutural do solo. Assim, parece oportuno que a engenharia abandone o seu olhar míope no trato de rupturas de encostas, focado apenas no volume e na distribuição das precipitações pluviométricas, para analisar melhor os efeitos provenientes da ação química das águas pluviais, servidas e oriundas de áreas agrícolas. A água, enquanto solvente e meio de transporte de substâncias químicas, atua sobre as propriedades e o comportamento do solo influenciando na estabilidade dos maciços e no processo de evolução das erosões.

A água possui também um elevado calor específico e, com isso, requer um elevado fornecimento de energia para que se altere sua temperatura. A título de exemplo, enquanto a água tem calor específico igual 1 cal/g.ºC, o alumínio apresenta calor específico igual a 0,22 cal/g.ºC e o ferro calor específico igual a 0,11 cal/g.ºC – convém lembrar que esses dois elementos químicos estão presentes em grandes quantidades nos solos tropicais. Percebe-se, então, que, ao precipitar-se sobre o solo a uma temperatura distinta da dele, a água da chuva não só promoverá variações térmicas significativas no solo, como também passará por alterações térmicas no processo de fluxo. Com isso, há que se considerar que não só ocorrerão variações de poros no solo devido às mudanças térmicas sofridas pelos minerais, como também a própria água terá sua viscosidade e densidade alteradas durante o fluxo e, por consequência, nele intervirá. Esses são aspectos que precisam ser melhor estudados e que são complementares ao efeito da chuva em si sobre as propriedades e o comportamento dos maciços terrosos.

Ainda sobre as propriedades da água, cabe lembrar a sua elevada tensão superficial, o que lhe propicia a formação do efeito membrana. Da interação água-atmosfera-mineral dá-se origem às tensões capilares que atuam nos solos não saturados, ampliando a sua resistência e estabilidade estrutural. No solo, a água atua ainda suprindo a demanda de energia das partículas de argila (forças de adsorção), o que as une fortemente na disputa pelas moléculas de água e torna o solo mais estável e resistente frente aos esforços a ele impostos. Com isso, torna-se indispensável que se leve em conta, no processo de infiltração, o potencial de energia existente no solo quando da chegada da frente de umedecimento ou secagem, pois essa frente atuará gerando gradiente de energia externa (coluna d'água) e interna (sucção/capilaridade). Assim, quando se tem a equação de permeabilidade:

$$Q = k.A.h/L \quad (1)$$

e se submete um determinado solo não saturado ao fluxo, considerando que o fluido não muda, a permeabilidade do solo não é alterada; o que se altera é a energia geradora do fluxo, pois à coluna gravimétrica de água deve ser adicionada a energia capilar e/ou de sucção presente no solo. Portanto, não há como se considerar isoladamente o efeito do volume de água precipitado pelas chuvas de sua distribuição e estado de hidratação inicial do solo, sem se referir aqui a outros elementos importantes, como a composição e acidez da água.

Assim, as águas pluviais apresentam composições químicas e propriedades como pH, condutividade elétrica e temperatura que variam ao longo do ano, de uma região para outra e com as próprias condições de precipitação, de uso e ocupação do solo. De modo geral, a influência dessas propriedades no processo de infiltração ainda não se encontra bem estudada no domínio da engenharia.

Para exemplificar, cita-se o trabalho de Maier *et al.* (1992), que caracterizaram as propriedades químicas da água da chuva na região do Córrego Salto Grande, Bacia do Rio Jacaré Pepira, localizado na parte central do Estado de São Paulo. No estudo, foram determinados: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, temperatura e teores de cálcio, magnésio, ferro, sílica e óxido de carbono (este pode dar origem a chuvas ácidas). As Figuras 2 e 3, construídas a partir dos dados apresentados por esses autores, ilustram, respectivamente, as variações de temperatura e do pH da água da chuva em função da data da coleta realizada 1m acima do nível do terreno. As variações de pH refletem a alteração da composição química da água da chuva, e a variação da temperatura está associada as condições climáticas regionais. Luiz (2012)

mostrou para a cidade de Goiânia que a temperatura da superfície do solo pode atingir valores superiores a 50ºC, enquanto a temperatura do ar próximo à superfície varia entre 16 e 32ºC de 1961 a 2008. Tanto a temperatura média mínima anual como a máxima tem aumentado com o passar dos anos. Luiz (2012) mostrou, ainda, que a temperatura na superfície varia com a altitude e orientação da vertente. Portanto, a água da chuva e a interação solo-atmosfera apresentam uma dinâmica que precisa ser mais estudada e melhor analisada diante dos problemas socioambientais da atualidade.

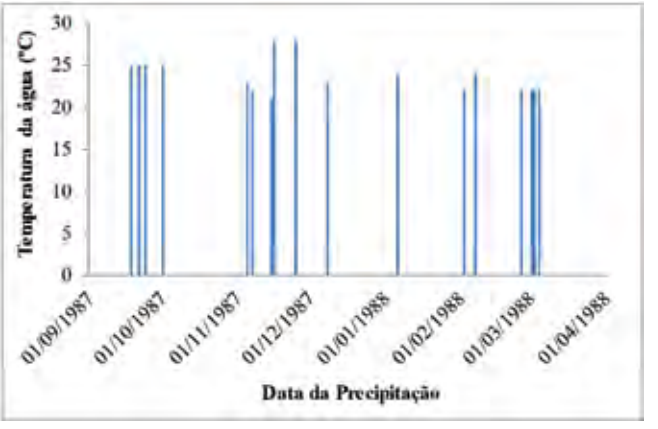


Figura 2. Temperatura da água da chuva (dados oriundos de Maier *et al.*, 1992).

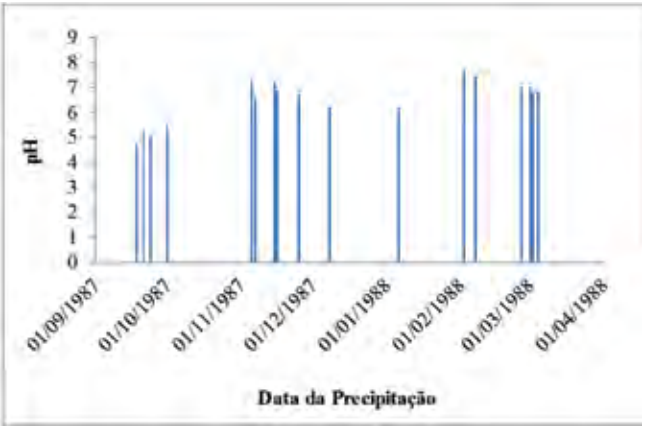


Figura 3. pH da água da chuva (dados oriundos de Maier *et al.*, 1992).

Apesar da complexidade da análise relativa à influência das características da água da chuva no processo de infiltração e na estabilidade estrutural dos maciços, vale a pena refletir, pois, embora devam ser ampliados os estudos sobre o assunto, há que se esperar que, com a alteração da qualidade da água, altera-se também o impacto desta sobre o solo, o que implica uma visão aparentemente limitada a associação de fenômenos como os de inundação, erosão, estabilidade de encostas e estabilidade estrutural do solo tão somente às precipitações vistas apenas sob a ótica quantitativa. É preciso um olhar para o aspecto qualitativo, suas propriedades físico-químicas.

4 A infiltração e sua relação com alagamentos e inundações

Os alagamentos e as inundações estão, na maioria das vezes, associados a grandes precipitações pluviométricas, embora possam ter origem em outras causas, como rupturas de tubulações em sistemas de abastecimento e rupturas de diques e barragens. Restringindo-se ao elo entre essas ocorrências e as chuvas, elas acontecem devido:

- ao excesso de impermeabilização em áreas urbana e periurbana;
- ao excesso de impermeabilização ou à facilidade com que as águas pluviais escoam superficialmente em áreas rurais localizadas a montante dos pontos de inundação;
- às duas causas precedentes conjuntamente.

Destaca-se, porém, que muitas áreas urbanas, periurbanas e rurais anualmente inundadas no período de chuva o seriam normalmente, por certo em menor escala, pois naturalmente elas já se submetiam aos efeitos de enchentes quando não ocupadas. A falha, nesse caso, encontra-se na ocupação de áreas com elevado risco. A solução é quase sempre desocupá-las, embora outras medidas, como a construção de diques, barragens de armazenamento regulatório ou aterros, possam ser adotadas, mas muitas vezes com maior custo e certo risco para os ocupantes da área.

A impermeabilização excessiva de áreas urbanas e periurbanas, geralmente, tem por consequência a ampliação do volume de água de chuva não infiltrado, acarretando dois problemas: o sistema de drenagem de águas pluviais não consegue responder à demanda, e a água não infiltrada ou não drenada dá lugar a alagamentos, inundações e erosões. Muitas vezes a ampliação da rede de drenagem de águas pluviais não resolve o problema; aliás, pode dar origem ao fenômeno da inundação propriamente dita quando a calha receptora não suporta o volume de água aportado por tais sistemas de drenagem. A solução do problema recorrente, assim como a ação preventiva em relação a novos espaços a serem ocupados passam por adoções de medidas estruturais e não estruturais. Como medidas estruturais, a solução ideal aponta para a necessidade de criar condições para infiltração da água de chuva próxima ao local onde é gerado o volume excedente. Essas condições podem ser geradas, dentre outras medidas, por meio da construção de reservatórios de armazenamento, bacias de retenção, bacias de detenção, poços, trincheiras, valas de infiltração, revegetação. Podem ainda ser adotadas soluções construtivas que reduzam o volume de água a ser drenado por esses sistemas, como a captação da água da chuva para uso doméstico e a adoção de pavimentos drenantes. A preservação de áreas verdes no que concerne aos alagamentos e às inundações é importante por reduzir o volume de águas pluviais excedente, sem que, no entanto, resolva de modo isolado o problema gerado pelas impermeabilizações excessivas. Ela tem função mitigadora e contribui para a recarga do aquífero.

As medidas não estruturais incluem, por exemplo, as normas e os regulamentos que disciplinam a ocupação e uso do solo e a conscientização da população por meio da educação formal e não formal. As ações não estruturais são muito menos onerosas, surtem efeito ao longo do tempo e, geralmente, contribuem para a redução de custos das ações estruturais.

A infiltração concentrada da água da chuva, além de comumente proporcionar a perda de resistência do solo quando este se encontra inicialmente em estado não saturado, pode ainda dar origem ao fenômeno da erosão interna, desencadeando ou ampliando processos erosivos ou gerando subsidências na superfície do terreno. Essas observações não condenam

o uso das citadas técnicas de infiltração; pelo contrário, elas são de grande importância. No entanto, a implantação de cada uma delas deve passar por estudos geotécnicos prévios em que se avaliem os riscos a elas relacionados.

Em áreas rurais, dois problemas podem ser originados com a redução da infiltração das águas pluviais e o consequente excesso de escoamento superficial: o do transbordamento das calhas de escoamento naturais, construídas ou retificadas, gerando inundações a jusante, e o do transporte de sedimentos erodidos até os córregos, rios e reservatórios, propiciando-lhes o assoreamento.

Nas áreas rurais, a remoção da cobertura vegetal facilita a ocorrência do fenômeno erosivo e da impermeabilização da superfície do terreno. A maior ou menor incidência desses fenômenos está geralmente ligada tanto às técnicas de manejo adotadas, quanto ao uso de insumos e defensivos agrícolas que agem desagregando o solo e facilitando o carreamento das partículas ou a sua compactação por efeito de retração. Trabalhar o solo em curvas de nível ou por meio de terraceamentos, assim como a preservação de cinturões verdes, facilita a infiltração das águas pluviais, propiciando a redução do volume escoado superficialmente e possibilitando que as calhas de drenagens suportem o volume de água aportado sem que ocorra transbordamento e, por conseguinte, inundações.

Em vista da necessidade de aprofundamento das reflexões e discussões sobre o processo de impermeabilização em áreas rurais, são apresentadas aqui algumas destas reflexões. É preciso, inicialmente, considerar-se o tipo de solo, sua composição químico-mineralógica, seu estado físico e a influência que essas características exercem nos comportamentos hidráulico e mecânico do solo. Os solos podem receber várias classificações: orgânicos ou inorgânicos, pouco intemperizados, de transição ou profundamente intemperizados, transportados ou residuais, expansivos ou colapsáveis, dentre outras particularidades. Quimicamente, podem ser enquadrados como ácidos ou básicos, orgânicos ou inorgânicos, de elevada ou de baixa capacidade de troca catiônica, etc. Mineralogicamente, os solos podem ser enquadrados como ricos em argilominerais 1:1 (uma folha tetraédrica : um folha octaédrica, grupo da caulinita) e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, ricos em argilominerais 2:1 (duas folhas tetraédricas : uma folha octaédrica, vermiculitas, micas, etc.) ou abundantes em minerais primários, como é o caso do quartzo e do feldspato, dentre outros. Fisicamente, eles podem ser vistos quanto à textura (solos granulares e solos finos), quanto à forma dos grãos (partículas lamelares, equidimensionais, tubulares, fibrilares, etc.), quanto à porosidade (solos muito ou pouco porosos) e quanto à distribuição dos poros (distribuição de poros bem graduada, uniforme e bi-modal).

A estabilidade estrutural dos solos é fruto do equilíbrio de energias internas, externas e entre elas. Quando se altera uma delas, torna-se possível a ocorrência do desequilíbrio estrutural dos agregados, dos pacotes de argila e do próprio solo, gerando fenômenos como os de ruptura de maciço, subsidências, erosão superficial e interna e a colmatação dos poros devido ao deslocamento de partículas. Mas é preciso que se diga que o processo de colmatação e lixiviação é muito mais complexo e pode, muitas vezes, estar ligado a atividades biológicas que criam e destroem poros em função do meio e de suas necessidades. Apesar de todos esses fatores e mecanismos, são discutidos aqui apenas os aspectos mais simples, que, se considerados, poderão contribuir para a solução de problemas socioambientais. Como grande parte dos solos agricultáveis e de áreas urbanas e periurbanas no Brasil estão a compor um perfil de intemperismo, as análises estão nele focadas.

No perfil de intemperismo, há do topo para a base solos profundamente intemperizados (solos lateríticos), porosos, bem drenados, de elevada permeabilidade, ricos em argilominerias 1:1 e em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, contendo partículas de silte e argila agregadas formando grãos de areia e mesmo carapaças lateríticas, com distribuição de poros geralmente bimodal, seguidos de solos de transição para os solos pouco intemperizados (solos saprolíticos), menos porosos, pouco permeáveis, ricos em argilominerais 2:1, com maior capacidade de troca catiônica e distribuição de poros bem graduada a uniforme. Nesses solos ou na transição normalmente se situa o nível d'água freático. Destaca-se que, em determinada área, é possível ocorrer o afloramento de apenas uma ou de todas essas camadas e da própria rocha em pontos distintos em função das condições de intemperização do maciço.

É preciso fazer uma ressalva quanto à drenabilidade do maciço, pois é comum a sua associação à textura e à porosidade global do solo, mas quando se trata de solos tropicais é necessária certa atenção. Assim, tomando-se um solo profundamente intemperizado, solo laterítico, e outro pouco intemperizado, solo saprolítico, ambos possuindo a mesma textura quando desagregados e/ou defloculados (não é a mesma coisa) e o mesmo índice de vazios global, é provável que eles apresentem permeabilidades e taxas de infiltração muito distintas. Isso se dá devido ao fato de que, enquanto no primeiro caso, solo profundamente intemperizado, o solo em estado natural apresenta a fração argila ou argila mais silte agregadas, formando elementos de tamanho areia com macroporos entre eles e microporos em seus interiores, no solo pouco intemperizado no máximo ocorre a presença de pacotes de argila. No entanto, na maioria dos casos ou em grande porcentagem da porção de solo, as partículas de silte e argila atuarão como grãos independentes, gerando poros menores entre eles. Assim, haverá, no primeiro caso, permeabilidades próximas às da areia e, no segundo, aquelas características dos siltes ou das argilas, conforme o caso. Diante disso, fica clara a importância de se preservar a estrutura dos solos profundamente intemperizados, de modo a favorecer o processo de infiltração e mitigar os processos erosivos.

5 A infiltração e sua relação com os processos erosivos de origem pluvial

Existe uma relação inversamente proporcional entre a infiltração e a erosão de superfície. No caso da erosão interna, a relação tende a ser diretamente proporcional, mas, em ambos os casos, a solução técnica de um determinado problema encontra-se ao alcance da engenharia. Já a solução de fato preventiva passa por mecanismos de regulação e controle e por processos de educação formal e não formal da população.

As erosões laminares ou superficiais e os sulcos acontecem, geralmente, em áreas rurais, embora possam também ocorrer em áreas urbanas e periurbanas. As erosões lineares ou em forma de anfiteatro tipo ravinas ou voçorocas, por sua vez, ocorrem predominantemente junto aos centros urbanos em consequência da impermeabilização excessiva e da concentração do fluxo superficial. Destaca-se, porém, que, apesar de menos noticiadas, elas ocorrem também em meio rural. Recentemente a Folha de S.Paulo apresentou extensa matéria no caderno Ciência sobre grandes erosões que estão ocorrendo no Estado de Goiás em consequência do desmatamento. A matéria teve por título: "Desmatamento abre crateras em Goiás" (LUCHETE, 2012). Em determinado trecho, a reportagem informa: "As voçorocas são mais comuns

em locais de solo arenoso e surgem quando chove muito e a água não consegue infiltrar no solo". Mais adiante se lê: "São formados então fios de água que escoam de forma concentrada e transportam o solo junto com eles". Um pouco à frente aparece o subtítulo "Nas cidades, ameaça são as voçorocas causadas por obras". Nesse subtítulo, a reportagem relata a erosão que surgiu em 1987, na cidade de Planaltina de Goiás, em consequência de uma drenagem de águas pluviais e que hoje apresenta 50 m de profundidade e 2,5 km de extensão. Segundo consta, ela já engoliu asfalto e árvores, danificou redes de água e energia elétrica e fez 32 famílias deixarem suas casas. O Ministério da Integração, segundo informação contida na reportagem, já desembolsou R$ 9.000.000,00, e a prefeitura alega precisar de R$ 42.000.000,00. Como se pode observar, gastam-se milhões em ações que talvez não resolvam, mas não se gastam tostões no processo de educação, que pode, se não resolver esses problemas específicos, evitar outros. O caso de Planaltina de Goiás relatado pelo Jornal Folha de S.Paulo é aquele apresentado na Figura 1 deste capítulo.

Retornando aos aspectos técnicos, discute-se a questão da infiltração. Em áreas urbanas, a infiltração ou é totalmente eliminada ou é mitigada. Raramente são preservadas as condições de infiltração do solo em seu estado natural, que compreende a cobertura vegetal. Resta, nesse caso, recorrer a sistemas de drenagens convencionais e/ou não convencionais. Surge a questão: qual a melhor alternativa? A resposta não poderia ser outra: depende – aliás, esta sempre deveria ser a resposta a vir à mente do engenheiro na busca de soluções de engenharia. A solução vai depender da resposta a uma série de perguntas como, por exemplo: as calhas de drenagem naturais comportam o lançamento das águas pluviais canalizadas sem que ocorram transbordamentos à jusante? As margens dessas calhas permanecerão estáveis, ou um processo complexo de instabilidades será iniciado? Dispõe-se de espaço para a adoção de sistemas de infiltração locais, como bacias de retenção, valas, trincheiras e sistema de poços em soluções mais coletivas, ou de poços isolados e trincheiras de pequeno porte em sistemas individuais? O solo é apto a receber sistemas de infiltração locais? A infiltração será passível de gerar danos socioambientais ou materiais? Nos casos das bacias de retenção, a administração pública está apta a monitorá-las sanitariamente? Enfim, várias outras questões poderão ainda surgir antes de se definir qual será a melhor opção do ponto de vista técnico, mas o certo é que as soluções de engenharia existem.

Em áreas rurais, a impermeabilização advém, quase sempre, de técnicas de manejo inapropriadas ou da própria ação do clima sobre o solo desprotegido. O primeiro aspecto diz respeito aos efeitos da energia cinética da água sobre o solo desprotegido (Figura 4). As

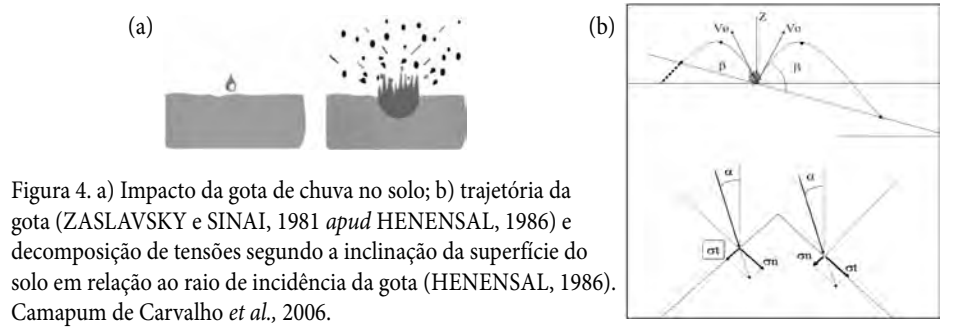


Figura 4. a) Impacto da gota de chuva no solo; b) trajetória da gota (ZASLAVSKY e SINAI, 1981 *apud* HENENSAL, 1986) e decomposição de tensões segundo a inclinação da superfície do solo em relação ao raio de incidência da gota (HENENSAL, 1986). Camapum de Carvalho *et al.,* 2006.

gotas de água de chuva, ao precipitarem, tocam o solo com uma energia cinética (Equação 2) que é, em parte, absorvida como energia de compactação e, em parte, fraciona-se, sendo lançada na forma de pequenas gotas. As partículas de solo desprendidas pelo impacto podem permanecer no local ou serem deslocadas no interior das pequenas gotas ou externamente a elas.

$$Ec = 0{,}5\ mv^2 \quad (2)$$

No movimento de queda das gotas, a velocidade aumenta com o seu tamanho, pois, enquanto a massa é proporcional ao cubo de seu diâmetro, a resistência do ar, que depende da área, varia com o quadrado do seu diâmetro. Geralmente a velocidade máxima é atingida após uma dezena de metros. Motta (2001) apresenta resultados de um estudo de laboratório em que avalia por simulação o efeito das gotas de chuva atuando de modo isolado sobre a superfície do solo proveniente de duas erosões. No estudo, o pesquisador encontrou maior erodibilidade para o solo mais arenoso e menos poroso, refletindo a relevância do caráter não coesivo no desprendimento das partículas sob o efeito das gotas de chuva.

A Figura 4b mostra que as energias dispendidas na compactação e no cisalhamento do solo dependerão do raio de incidência da gota em relação à superfície do terreno, ou seja, uma chuva de mesma intensidade e duração tocando o solo com a mesma energia terá o seu impacto em termos de compactação e desagregação dependente da direção do vento.

Diante do exposto, a capacidade de infiltração do solo poderá ser reduzida quando da precipitação, seja devido ao processo de compactação, seja devido à colmatação dos poros gerada por pequenas partículas de solo deslocadas. É preciso que se some a esses efeitos o fato de que muitos dos insumos agrícolas incorporados ao solo como nutrientes ou defensivos, além de afetarem a biota, podem propiciar por si sós a sua desagregação, ampliando o efeito das gotas de chuva no deslocamento de partículas e na colmatação de poros.

Outro problema que surge em área rural é o da compactação do solo gerada pelos ciclos de molhagem e secagem. Camapum de Carvalho (1985) mostra, para um solo fino rico em carbonado de cálcio, que a retração por secagem conduziu o solo a uma porosidade equivalente à energia de compactação Proctor Intermediário. No Capítulo 11 deste livro, Oliveira *et al.* (2012), ao estudarem um Latossolo Vermelho, mostram que insumos agrícolas contendo cloreto de potássio, ureia, calcário dolomítico e fósforo desagregam e facilitam a compactação do solo no processo de secagem. Destaca-se que a própria desagregação do solo já é causa de redução da infiltrabilidade, pois macroporos estarão dando lugar a poros menores. Cabe ainda esclarecer que, embora a literatura se refira à compactação como a redução de índice de vazios oriunda da aplicação de uma energia externa ao solo contendo certa umidade, aqui o efeito é o mesmo, porém a energia que provoca a redução de vazios é a interna, devido a variações de sucção/capilaridade.

A compactação do solo gerada pelos ciclos de molhagem e secagem oferecerá como consequência a redução da permeabilidade e, portanto, da infiltrabilidade a partir da superfície do terreno em consequência da diminuição da porosidade. Ocorrerá ainda um ganho de resistência que será, em grande parte, aparente devido à atuação da sucção/capilaridade (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A capacidade de infiltração em meio rural pode ainda ser reduzida por meio do pisoteio de animais e passagem de máquina e poderá ser ampliada por bioturbações oriundas da ação

de animais e plantas. A ação de microrganismos, como bactérias, poderá propiciar o aumento ou a redução da infiltrabilidade e da desagregabilidade a depender, por exemplo, dos nutrientes presentes ou incorporados ao solo (GONZÁLEZ, 2009).

Além desses aspectos que passam a ser intrínsecos ao estado do solo, facilitando ou dificultando a infiltração, é necessário considerar o processo de infiltração e seus reflexos no comportamento do fluxo e na estabilidade estrutural do solo. Iniciado o processo de infiltração em consequência direta da precipitação ou por meio de um poço, trincheira ou vala de coleta, ao se formar uma lâmina d'água contínua na superfície do terreno não saturado com fase ar contínua, quando a frente de saturação avança para o interior do maciço em consequência da energia gravitacional oriunda da coluna de água e devido à atuação da sucção/capilaridade, surgem dois efeitos: a) a frente de saturação coloca a fase ar sob pressão positiva, a qual passa a atuar como barreira ao fluxo; b) caso a pressão gerada na fase ar ultrapasse a resistência ao cisalhamento do solo em condição saturada, ocorrerá a sua desagregação. Eventualmente, em solos muito ressecados, para os quais a umidade seja inferior à de entrada de ar nos microporos que compõem os vazios dos agregados, poderá ainda ocorrer o esfacelamento desses agregados quando a pressão positiva na fase ar superar a coesão e/ou cimentação que dá sustentação ao agregado. Esses fenômenos relativos ao processo de infiltração se relacionam tanto à própria infiltração como ao fenômeno da erosão, pois, quanto mais desagregado, mais erodível é o solo.

Poder-se-ia considerar que o fenômeno da erosão por desgaste do solo de superfície, incluindo-se as erosões laminares, sulcos, ravinas e voçorocas, guarda íntima relação com o da infiltração, embora essa relação não seja direta. A infiltrabilidade está ligada à porosidade, à distribuição de poros, à composição químico-mineralógica, à textura do solo e ao seu estado de saturação inicial. A erodibilidade também está ligada a esses aspectos; entretanto, neste caso, tende a variar quase sempre em sentido inverso. Para avaliar a influência de cada elemento, é razoável refletir em termos de energia. Assim, solos mais granulares, por gerarem menor perda de carga para a água que flui, apresentam maior infiltrabilidade e, por apresentarem maior energia de contato, serão menos erodíveis. Solos texturalmente argilosos em estado natural, ou seja, não agregados, apresentam maior energia de superfície e geralmente menores poros, o que propicia a ocorrência de baixa infiltrabilidade. Quanto ao processo erosivo, a consequência de sua natureza não é necessariamente inversamente proporcional à infiltrabilidade, pois, se por um lado um solo argiloso com baixa coesão real será provavelmente muito erodível, por outro, se possuir elevada coesão real ou for cimentado, apesar de argiloso, ele tenderá a resistir à energia geradora da erosão. Quanto à porosidade, devem-se avaliar o seu valor e a sua distribuição, pois a perda de energia durante o fluxo termina sendo menor em macroporos que em microporos. Os solos profundamente intemperizados são, geralmente, marcados pela presença de macro e de microporos, constituindo-se em materiais bem drenados, de elevada infiltrabilidade. No entanto, apesar de agregados e cimentados, quase sempre não oferecem resistência suficiente para cambarem a energia erosiva da água. Sobre o estado de saturação, no processo de infiltração, a sucção capilaridade, quando a fase ar é contínua, atua ampliando a energia hidráulica e, por consequência, o gradiente favorável ao fluxo. Nesse caso, quando do avanço da frente de saturação, a fase ar colocada sob pressão positiva pode gerar uma camada gasosa que se opõe à infiltração, ou seja, a rápida infiltração

inicial pode abruptamente ser cessada. Quando a fase ar é descontínua, as bolhas de ar existentes podem atuar obstruindo a drenagem durante o processo de infiltração. No que tange à erodibilidade, a perda de sucção implica a perda de resistência, tornando o solo mais erodível. Mas existem também efeitos colaterais favoráveis ao processo erosivo, como a desagregação do solo quando a pressão positiva na fase ar ultrapassa a coesão real do solo ou do agregado, incluindo-se a cimentação.

Desta breve e certamente incompleta discussão é possível notar que os fenômenos erosivos e de infiltração devem ser avaliados caso a caso, até porque, além das questões da erodibilidade e da infiltrabilidade da água no solo, há que se considerar o potencial de erosividade da água. A erosão e a infiltração nos maciços devem ainda levar em conta aspectos como o nível de intemperização do maciço, a geomorfologia, a topografia, a geologia estrutural e a hidrogeologia, a cobertura do solo e a sua ocupação e uso, a altitude devido às variações térmicas e de pressão, a umidade relativa do ar no processo de interação solo-atmosfera e ainda a influência das características do fluido em relação ao solo, como temperatura, viscosidade e composição química que acabam intervindo no processo de erosão e infiltração. Mesmo a carga de sedimentos ou a dissolução de compostos químicos durante o fluxo são elementos intervenientes no processo de infiltração e erosão. Portanto, a questão é complexa, mas a engenharia vem apresentando significativos avanços na direção do seu entendimento.

6 A erosão interna e outros processos que atuam no desencadeamento e na evolução das erosões

A erosão interna pode também, de algum modo, ser relacionada ao avanço da infiltração. Assim como no caso da erosão de superfície, a erosão interna depende da porosidade, da distribuição de poros, da composição químico-mineralógica, da sensibilidade, da textura e de sua distribuição e do estado de saturação inicial do solo. A erosão interna, geralmente, ocorre quando a energia de percolação supera a capacidade do solo de resistir a essa energia, razão pela qual há dependência de todos os fatores citados. A infiltração, por sua vez, é exatamente a expressão das energias gravitacional e interna que buscam fazer com que o fluxo ocorra. De modo geral, o problema está ligado ao fato de o gradiente hidráulico atingir um valor crítico capaz de desestruturar o solo. O fenômeno pode ser progressivo enquanto atuação ao longo do tempo no maciço como um todo, ou abrupto, atuando no ponto de saída onde o gradiente torna-se crítico e desloca-se para o interior do maciço, fazendo-se também progressivo no tempo. O primeiro caso geralmente ocorre quando tem lugar o fenômeno da dissolução ou quando a matriz grossa não é filtro da fina, a qual não suporta os efeitos do gradiente hidráulico. Camapum de Carvalho *et al.* (1999) relatam um caso interessante de ocorrência desse fenômeno no Distrito Federal. O local que antes servira como jazida para a construção da rodovia BR 060 encontrava-se próximo ao bordo da chapada. Sua atuação como bacia de infiltração ao longo dos anos provocou o carreamento da matriz fina, desestabilizando o maciço e criando uma cavidade interna. Quando da execução de escavações para implantação de uma lagoa de estabilização, o topo da cavidade rompeu-se e a máquina que operava no local

deslocou-se verticalmente por mais de 1 m. Nesse caso, o fenômeno foi de erosão interna, mas não de tubificação (*piping*), como geralmente ocorre nas voçorocas onde, pontualmente, parte do maciço se rompe na face por não suportar a energia de percolação, pressão e/ou força cisalhante de contato nos minerais.

Cabe pontuar-se aqui a atuação de fluxos internos ascendentes ligados a fenômenos hidrogeológicos que podem atuar, seja impedindo a infiltração, seja facilitando o processo de erosão de superfície e interna. Esse fenômeno não é raro na base de encostas e no pé de taludes de voçoroca.

Outro fenômeno que atua no processo de evolução das voçorocas é o relativo ao solapamento da base de ravinas e voçorocas, conforme mostrado por Santos (1997), ao estudar erosões em Goiânia, no Estado de Goiás.

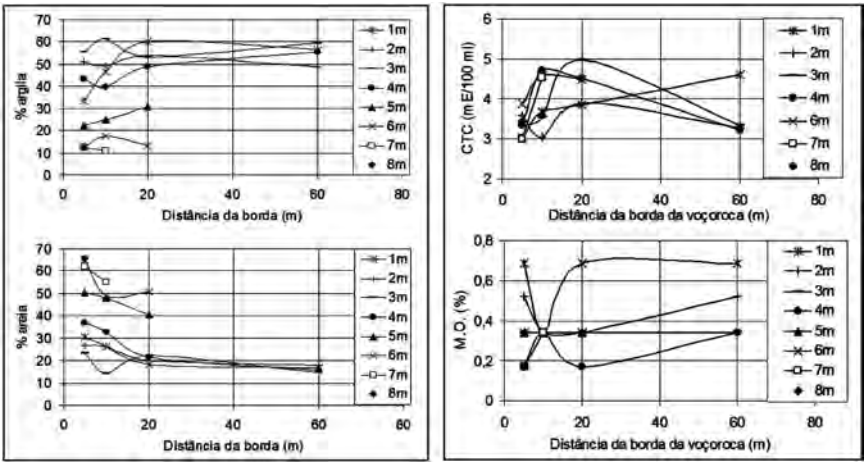
7 O fenômeno da esqueletização e sua relação com a infiltração e evolução dos processos erosivos

A esqueletização aqui tratada corresponde ao termo geomorfológico eluviação, que é a dissolução e/ou o carreamento de coloides gerados pelo processo de infiltração. O termo esqueletização foi usado por Roose (1977) *apud* Henensal (1986) no sentido de que a remoção de compostos químicos dissolvidos e de coloides vai corroendo o corpo do maciço e transformando-o em um esqueleto. Não se estabelece aqui uma oposição ao uso do termo eluviação, aliás, tecnicamente talvez ele seja o mais apropriado, mas o termo esqueletização parece assumir linguagem mais direta para o engenheiro.

Lima (2003), ao estudar maciços junto a ravinas e voçorocas do Distrito Federal, mostrou que o fluxo tanto em meio saturado como em meio não saturado pode alterar a composição físico-química do solo. Camapum de Carvalho *et al.* (2002) mostraram que a estabilidade da caulinita também pode ser alterada em casos semelhantes.

Em resumo, a redução da infiltração em áreas rurais e urbanas favorece o surgimento de novas erosões devido ao maior volume do fluxo superficial laminar ou concentrado. Por outro lado, uma vez instalado o processo erosivo, o aumento da infiltração próxima às bordas das ravinas e voçorocas atua de maneira deletéria, por colaborar no processo de esqueletização e por aumentar as forças de percolação em direção à erosão.

A Figura 5 ilustra, para a erosão Ceilândia 1 estudada por Lima (2003), as variações físico-químicas que ocorrem no maciço que circunda ravinas e voçorocas conduzindo à ocorrência do fenômeno da esqueletização. O maciço esqueletizado tem por consequência o aumento da sua capacidade de infiltração e potencializa a possibilidade de avanço da erosão por meio de rupturas de talude. O processo tem grande importância na análise de estabilidade de encostas e pode ser agravado pela infiltração de águas servidas e água poluída com insumos agrícolas. Ou seja, atribuir as rupturas de encosta ao simples efeito das precipitações dentro de uma visão quase estática e certamente míope é subestimar a dinâmica de origem antrópica dos maciços. Destaca-se que, como técnica de recuperação de maciços em processo de esqueletização, é possível o uso de biomineralização pela utilização de bactérias nativas, como mostrado por González (2009).



(a) (b)

Figura 5. a) Alteração da textura em função da distância da borda da voçoroca Ceilândia 1; b) alteração da capacidade de troca catiônica (CTC) e do teor de matéria orgânica (M.O.) em função da distância da borda da voçoroca Ceilândia 1 (LIMA, 2003).

8 A infiltração e os modelos de evolução das erosões

As erosões laminares são tanto mais progressivas quanto menores as taxas de infiltração, pois se amplia o escoamento superficial. É comum, no entanto, dada a grande espessura do manto de intemperismo, o fenômeno ser pouco notado pelo produtor rural, razão pela qual são necessárias campanhas educativas de esclarecimento. Nesse caso, é mais comum a avaliação do potencial de erosão superficial por meio da equação universal de perda de solo.

O desencadeamento de ravinas e voçorocas é, geralmente, fruto da concentração do fluxo superficial e de lançamentos de água de modo inapropriados. Elas têm seus modelos evolutivos fixados pela forma de concentração do fluxo superficial, pelo processo de infiltração e fluxo interno, pela geologia estrutural, pela hidrogeologia e pelas variações de umidade por que passa o maciço. Elas ocorrem tanto em meio rural como em meio urbano e periurbano.

O mecanismo de evolução das erosões é inegavelmente complexo. Em superfície, seja laminar, em sulco, ravina ou voçoroca, a erosão ocorre sempre que a energia cisalhante externa imposta pelo fluxo superar a energia cisalhante resistente interna. A energia cisalhante externa dependerá de fatores como velocidade do fluxo e densidade, viscosidade e temperatura do fluido. Sua transferência ao solo é função de fatores como rugosidade e forma do relevo. Já a energia interna depende de fatores como sucção inicial, distribuição de poros, coesão real, textura e interação entre partículas, cabendo lembrar que as partículas da superfície só interagem com as demais em sua base. Por isso, há certa dificuldade em fazer associações diretas com a resistência ao cisalhamento. Fácio (1991), ao estudar ravinas e voçorocas do Distrito Federal, verificou, por meio de ensaios Inderbitzen, que a erodibilidade do solo depende do seu estado de saturação inicial. Lafayette (2006) chegou a conclusão semelhante ao estudar erosões em Recife, no Estado de Pernambuco.

A Figura 6 mostra, para duas erosões estudadas por Lafayette (2006), resultados distintos para dois pontos oriundos da encosta que intitulou como central. A amostra FB (Figura 6a) é oriunda da Formação Barreiras, e a SR (Figura 6b), um solo residual de granito. Para a amostra FB coletada a 1,5 m de profundidade, com umidade natural igual a 12,94 % e índice de vazios igual a 0,84, foram bastante semelhantes os resultados de perda de solo obtidos em função das tensões hidráulicas calculadas para a superfície de fluxo para o solo na umidade natural e para a amostra pré-umedecida (Figura 6a). Já para o solo SR cuja umidade inicial era de 11,34% e o índice de vazios igual a 0,90, esses resultados são distintos, sendo superiores os resultados de perda de solo obtidos para a umidade natural (Figura 6b). Para ambas as amostras, os resultados de perda de solo obtidos para o solo seco ao ar foram superiores aos demais. Destaca-se que, apesar de o solo FB apresentar umidade um pouco superior ao solo SR, dada a diferença de índice de vazios, o seu grau de saturação (Sr = 40,5%) era ligei-

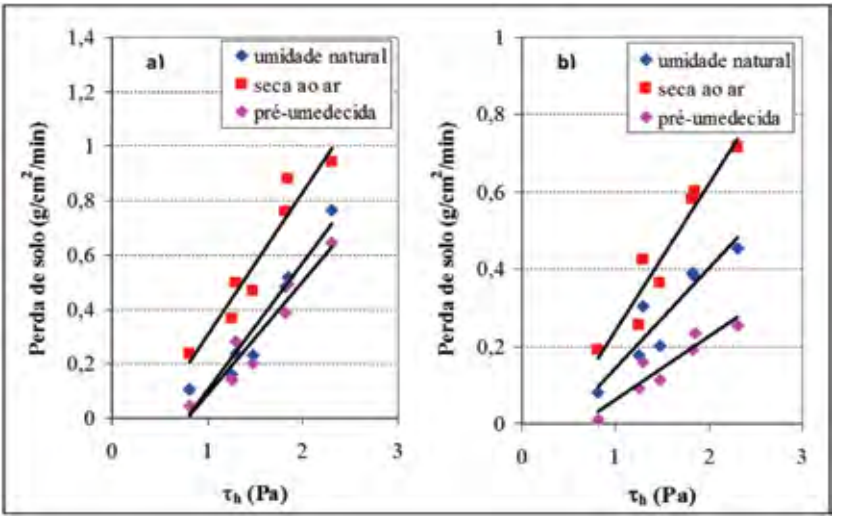
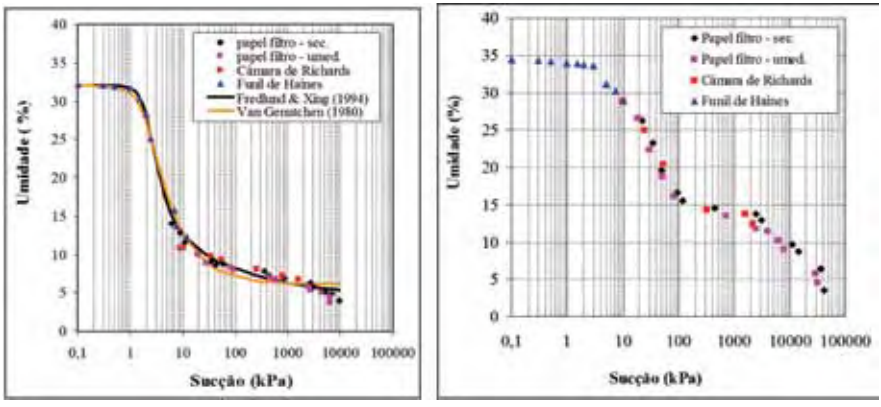


Figura 6. Resultados de Inderbitzen para os solos: a) P-01 FB (1,5 m); b) P-01 SR (4,5 m) (LAFAYETTE, 2006).

ramente inferior ao do solo SR (Sr = 41,4%). Com base apenas nessas informações era de se esperar comportamentos semelhantes; no entanto, as curvas características obtidas para os dois solos (Figura 7) explicam as diferenças registradas. Verifica-se que para o solo FB (Figura 7a) o término de entrada de ar nos macroporos se dá para umidade próxima à natural, o que implica comportamentos mecânicos, como, por exemplo, resistência a erosão, similares para umidades maiores ou iguais a esta. A curva característica mostra, ainda, que até esta umidade as sucções presentes no solo são muito pequenas, não superando 10 kPa.

Considerando-se a curva característica do solo SR (Figura 7b), observam-se dois aspectos importantes: o primeiro é que a macroporosidade tem poros menos uniformes (melhor graduados), levando a um aumento progressivo da sucção até que se atinja o término de entrada de ar nos macroporos; o segundo é que a umidade natural já se encontrava, nesse caso, aparentemente na zona de microporos, implicando valores de sucção da ordem de 10.000 kPa. Para o solo seco ao ar, a sucção atinge valores da ordem de 50.000 kPa. Com isso, as curvas características obtidas para os dois solos não só explicam os comportamentos distintos

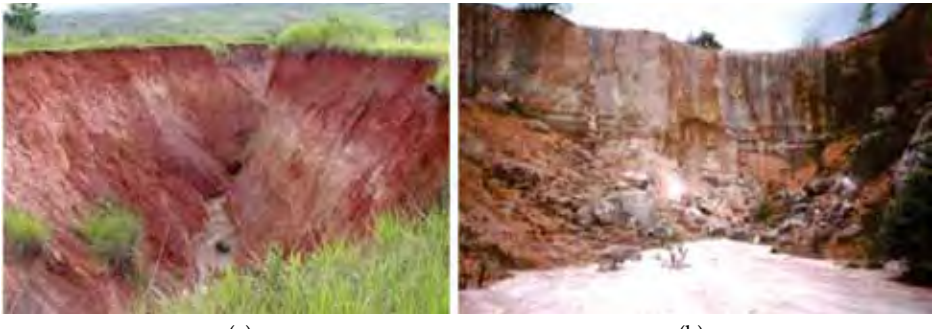
obtidos quanto à erodibilidade, como também realçam a importância de se considerarem a porosidade, a distribuição dos poros e o estado de umidade em que se encontra o solo quando se avalia o potencial de erodibilidade dos perfis de solos tropicais.



(a) (b)

Figura 7. Curvas características: a) solo P-01 FB; b) solo P-01 SR (LFAYETTE, 2006).

As ravinas e voçorocas, ao se formarem, assumem formas lineares ou em anfiteatro, formas estas geralmente condicionadas pela geomorfologia, geologia estrutural e perfil de intemperismo. Mortari (1994), ao levar em conta a geologia estrutural, propôs como modelo evolutivo para as voçorocas do Distrito Federal o modelo encaixado, no qual, uma vez atingido o extrato rochoso, o fluxo se encaixava por meio de erosão nas camadas menos resistentes e era contido lateralmente pelas mais resistentes (Figura 8a). Lima (1999), por outro lado, mostrou para algumas erosões em Manaus, no Estado do Amazonas, que a forma de evolução das erosões regionais em anfiteatro, por meio da queda de blocos, estava ligada à geologia estrutural imposta por trincas e fraturas de origem neotectônica (Figura 8b). As águas pluviais nelas se infiltravam e, enquanto nas transversais ao talude geravam certa lixiviação, nas paralelas a ele exerciam empuxos que faziam tombar os blocos. Lima (2003) associou o crescimento de ravinas e voçorocas do Distrito Federal ao processo de esqueletização do maciço que os enfraquecia com o tempo, gerando rupturas de taludes.



(a) (b)

Figura 8. a) Voçoroca à margem esquerda da BR 070, no Distrito Federal. b) Voçoroca na periferia de Manaus (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

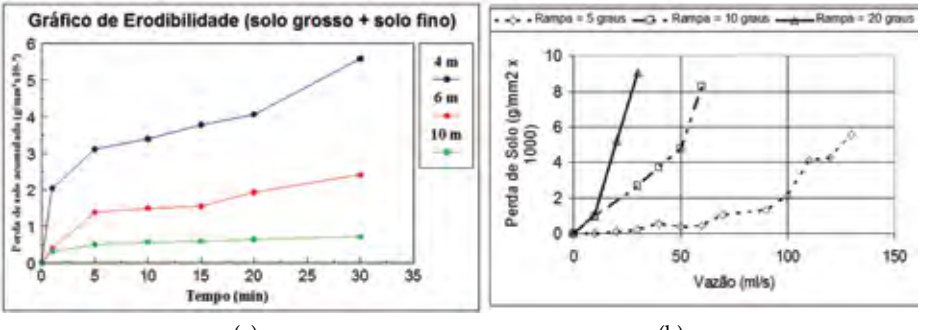
As ravinas e voçorocas, ao encontrarem um substrato resistente, podem ainda progredir lateralmente, assumindo a forma de U. Destaca-se que a voçoroca mostrada na Figura 9a encontra-se próxima à mostrada na Figura 8a: uma está em um lado da BR 070, e a outra no lado oposto, porém ortogonais entre si. Ou seja, o recorte do maciço no manto intemperizado é ditado pela direção do fluxo superficial e não pela geologia estrutural – esta condiciona apenas o modelo evolutivo após o rasgo encontrar o substrato resistente, sendo em um caso encaixado e no outro em forma de U. Muitas vezes, a erosão evolui internamente, dando origem a subsidências de grande porte, como a mostrada na Figura 9b fotografada em 1996, no Distrito Federal (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006). Essas subsidências podem, como foi o caso, darem em seguida origem a erosões de superfície.

(a) (b)

Figura 9. a) Voçoroca à margem direita da BR 070; b) Subsidência (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

Em direção a montante, é comum as ravinas e voçorocas progredirem em função do aporte de fluxo superficial ou por meio de erosões internas. Ambas as causas podem também atuar lateralmente. No caso das ravinas, o fenômeno geralmente ocorre em consequência da construção de bacias de infiltração a montante.

A Figura 10 mostra resultados obtidos em ensaios Inderbitzen apresentados por Camapum de Carvalho *et al.* (2006). Na Figura 10a, estão os resultados obtidos para amostras



(a) (b)

Figura 10. a) Erodibilidade de um perfil de intemperismo (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006). b) Influência da vazão e da rampa na perda de solo (FÁCIO, 1991).

indeformadas coletadas a 4 m, 6 m e 10 m de profundidade em um perfil de intemperismo do Distrito Federal. Sabendo-se que o nível de intemperismo aumenta com a profundidade no perfil, esses resultados mostram que quanto mais intemperizado o solo regional maior sua erodibilidade por fluxo superficial. A Figura 10b mostra, por meio de ensaios de Inderbitzen sobre amostras indeformadas, também para solos do Distrito Federal, que quanto maior a declividade da rampa e a vazão na superfície maior a erodibilidade do solo intemperizado.

9 Técnicas de ensaio utilizadas no estudo da infiltrabilidade e da erodibilidade

Na literatura são apresentadas relações que permitem estimar a permeabilidade e a erodibilidade a partir das propriedades físicas dos solos. Destaca-se, no entanto, que, quando se trata de solos argilosos profundamente intemperizados, os resultados obtidos deixam a desejar.

A avaliação da erodibilidade superficial em laboratório é comumente feita por meio do ensaio de Interbitzen e a interna por meio do ensaio do furo de agulha (*pinhole test*).

O ensaio de furo de agulha foi proposto para estudar a erosão interna em solos dispersivos, o que não é o caso dos solos profundamente intemperizados. No entanto, Santos (1997) mostrou que essa técnica de ensaio, ao se controlar a vazão nas fases de aumento e de diminuição do gradiente hidráulico, pode constituir-se em ferramenta importante na avaliação da degradação do maciço. Quando as vazões na fase de descarga superam as obtidas na fase de carga, há um indicativo de que o solo apresenta degradação estrutural com o fluxo (Figura 11, solo BP-5). Quando a vazão nas duas fases não se altera, tem-se um solo que mantém a estabilidade estrutural diante do fluxo (Figura 11, solo BP-6).

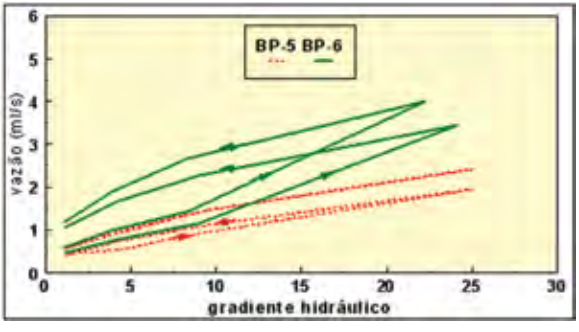


Figura 11. Resultados de ensaios de Pinhole para a voçoroca do Batalhão Florestal de Polícia, em Goiânia (SANTOS, 1997).

10 Considerações finais

O conteúdo deste capítulo mostra que existe uma íntima relação entre as restrições impostas à infiltração por força da excessiva impermeabilização em meio urbano e de técnicas de manejo inapropriadas em meio rural e os problemas de alagamentos, inundações, erosões e esqueletização de maciços.

Embora tenha se voltado mais especificamente para os problemas citados, o capítulo aponta para a necessidade de se levar em conta o processo de esqueletização dos maciços nas análises de estabilidade de encostas. Outro aspecto a ser considerado são as mudanças climáticas oriundas de ações antrópicas, pois estas não só afetam parâmetros como a intensidade das precipitações, o seu regime de distribuição e a temperatura, como também alteram a própria qualidade da água da chuva, podendo, assim, intervir diretamente no processo de esqueletização instabilizador do maciço. Atribuir os problemas socioambientais atuais a simples mudanças climáticas naturais é não querer mudar o cenário nem assumir responsabilidades. É atrelar-se a uma visão míope do problema. Apenas a título de exemplo, priorizar o transporte individual em detrimento do público é caminhar em sentido contrário ao necessário, pois ao mesmo tempo em que a ampliação das áreas pavimentadas com mais ruas, avenidas e rodovias aumenta a impermeabilização, gerando maior volume de água superficial capaz de desencadear inundações e erosões, o aumento da frota de veículos promove a elevação da temperatura e contamina a atmosfera com gás carbônico, propiciando mais precipitações e chuvas mais ácidas, o que nos dois sentidos podem atuar na instabilização estrutural dos maciços. Luiz (2012) mostrou, para a cidade de Goiânia, no Estado de Goiás, que há uma íntima relação entre o aumento da população e a elevação da temperatura. É evidente que a causa não é o simples aumento da população; existem outros fatores, como o excessivo aumento da frota de veículos, o que se dá pelo modelo de desenvolvimento equivocado, pela falta de transporte público, pela excessiva demanda por transporte em função de planos urbanísticos deficientes que obrigam a grandes movimentações.

É preciso que o modelo de desenvolvimento seja repensado, redirecionado, para que se torne socioambientalmente sustentável. É necessário maior foco na educação, na formação de uma consciência voltada para a vida e para a sua qualidade. São necessárias transformações sociais e econômicas voltadas para o desenvolvimento humano, para o equilíbrio ambiental.

Referências bibliográficas

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1985). Etude du comportament mécanique d'une marne compactée. Toulouse, França : INSA, 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, França.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DINIZ, N. C. (2005). Cartilha Erosão. Brasília: FINATEC. 33 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C. (2006). Cartilha Meio Ambiente: Erosão. Brasília: FINATEC. 26 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (2006). Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro. Brasília: FINATEC. 464 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C. (2010). Cartilha Infiltração. Brasília: Faculdade de Tecnologia. Série Geotecnia, v. 2, 36 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C. (2011). Cartilha Meio Ambiente: Infiltração. Brasília: Faculdade de Tecnologia. Série Geotecnia, v. 3, 48 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PASTORE, E. L.; PEREIRA, J. H. F.; FRANCO, H. A.; BROSTEL, R. C. (1999). Estudo e solução para os problemas de erosão interna nas lagoas de estabilização de Recanto da Emas – DF. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL - REGEO'99, 4, 2 a 4 de dezembro de 1999, São José dos Campos, Anais... São José dos Campos: ABMS. v. 1, p. 1-9.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, E. M.; LIMA, M. C.; RIBEIRO, M. O. (2002). Variação no comportamento térmico de caulinitas de uma cobertura superficial no Distrito Federal. *In*: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – XII COBRAMSEG,12, 20 a 24 de outubro de 2002, São Paulo, Anais... São Paulo: ABMS. v. 1, p. 537-546.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. (2006). Processos erosivos. Brasília, DF: FINATEC. *In:* CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M.T.S. Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Cap. 2. p. 40-91.

FÁCIO, J. A. (1991). Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Brasília: UnB, 107 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM-002 A/91.

GONZÁLEZ, Y. V. (2009). Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Brasília: UnB, 183 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-059A/09.

HENENSAL, P. (1986). L'érosion externe des sols par approche quantitative et mécanismes. Rapport de Recherche LPC 138. 76 p.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. (2009). Dicionário Houaiss da língua portuguesa. Rio de Janeiro: HOUAISS, 1986 p.

LAFAYETTE, K. P. V. (2006). Estudo geológico-geotécnico de processo erosivo em encostas no parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/Pe. Recife: UFPE, 358 fl. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

LIMA, M. C. (1999). Contribuição estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus. Brasília, DF: UnB, 150 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM-057A/99.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília, DF: UnB, 336 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-17A/03.

LUCHETE, F. (2012). Desmatamento abre crateras em Goiás. Folha de S.Paulo, 23 jan. 2012, Caderno Ciência, C13.

LUIZ, G. C. (2012). Relação solo/atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – município de Goiânia/GO. Brasília, DF: UnB, 271 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, G.TD – 075A/2012.

MAIER, M. H.; TAKINO, M.; MIYAMARU, L. L. (1992). Alguns aspectos da composição da água da chuva (Microbacia do Córrego do Salto Grande 22º09'S e 48º19'W. Acta Limnol. Brasil, v. IV, p. 247-254.

MORTARI, D. (1994). Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal. Brasília: UnB, 200 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM-010A/94.

MOTTA, N. O. (2001). Caracterização geotécnica e dos processos erosivos na cidade de Campo Grande – MS. Brasília, DF: UnB, 179 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM-077A/2001.

OLIVEIRA, M. C.; FAGG, C. W.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CORREIA, C. R. M. A. (2012). Queimadas, práticas agrícolas, recuperação de áreas degradadas e a infiltração no Cerrado. Brasília - DF: FT. *In*: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G.F.N.; CARVALHO, E.T.L.. Cap. 11.

ROOSE, E. (1977). Erosion et ruissellement em Afrique de l'Ouest. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M., n. 78, Paris.

SANTOS, R. M. M. (1997). Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia. Brasília: UnB, 120 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DM-044A/97.

ZASLAVSKY, D.; SINAI, G. (1981). Surface hydrology: I – Explanation of phenomena. II – Distribution of raindrops. III – Causes of lateral flow. IV Flow in Sloping, layered soil. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, v. 107, n. HY1, Proc. Paper 15958 a 61.

Capítulo 29
Infiltração – outros impactos físicos e químicos

Wilson Conciani
Renata Conciani
Mônica Carolina Ciriaco Dias

1 Introdução

Nos capítulos anteriores, foi visto que, de um modo geral, a infiltração de água no solo é benéfica ao meio ambiente. Por outro lado, também foi visto que há casos em que a infiltração de água no solo é a responsável por grandes desastres ambientais. No livro "Tormentas Cariocas", Rosa e Lacerda (1997) mostram os grandes desastres que a infiltração de água das chuvas causa no Estado do Rio de Janeiro. Também Carvalho (1997) executou um grande conjunto de instrumentação na Serra do Mar para emitir alertas de risco de escorregamento devido à infiltração de águas das chuvas.

Alguns dos capítulos anteriores deste livro mostraram os processos de infiltração, seus mecanismos e comportamento a depender das propriedades do solo, do perfil geomorfológico, da estratigrafia e da cobertura local. Essas características levam ao desenvolvimento de outros processos nem sempre associados com a infiltração. Neste capítulo, serão trazidas algumas informações que buscam mostrar que, para situações especiais, a infiltração é responsável por alguns processos físicos e químicos que culminam em grandes impactos ambientais, sociais e econômicos.

Os noticiários, vez por outra, anunciam que "uma enorme cratera abriu-se subitamente na cidade". O trecho a seguir é uma dessas notícias:

> *Eram 9 horas da manhã de 12 de agosto de 1986 quando um forte estrondo, semelhante a uma explosão de uma bomba, foi ouvido pela vizinhança da rua Barão de Rio Branco, atual Valdomiro dos Santos. Abriu-se, de repente, um buraco no meio da horta do quintal da casa de Ilda. O buraco cresceu e começou a engolir as residências ao redor, e até mesmo um sobrado de dois andares, recém-construído, foi tragado pelo solo.*[1]

Notícias similares surgem não apenas no Brasil, mas também em outros territórios. Em 2006, surgiu o caso de uma cratera aberta na Guatemala, em pleno centro urbano. Essas crateras estão associadas ao tipo de solo e à infiltração de água. Os casos aqui citados são de subsidências associadas a um tipo específico de formação geológica: os Carstes cobertos ou não com solo.

1 Jornal o Estadão. Caderno Cidades. 18 jan. 2007. Disponível em: http://www.estadao.com.br/arquivo/cidades/2007/not20070118p15210.htm. Acesso em: 29.04.2012.

Existem outros casos de subsidências de grandes áreas onde o fato também está associado à infiltração, porém, com mecanismos diferentes. Nessa categoria estão aqueles ligados ao fenômeno do *pipping*, que também gera a formação de vazios sob a superfície do solo. No Brasil, há alguns relatos de casos como esses na região noroeste do Estado de São Paulo. Também há relatos de casos de subsidências desse tipo no Planalto do Parecis, no Estado de Mato Grosso. Também sobre essa situação a imprensa encontra vasto material para reportagens sensacionalistas. Lembra-se aqui o caso da reportagem publicada em rede nacional de televisão que dizia: "A cidade de Campo Novo do Parecis está desaparecendo dentro de buracos que surgem bruscamente na superfície. A população está apavorada"[2].

Sallun Filho e Karmann (2008) relatam a ocorrência de dolinas em Formações Aquidauana, em Jardim (MS), e Furnas, em Ponta Grossa (PR). Nas duas regiões, os mecanismos de formação de dolinas são diferentes. Enquanto em Ponta Grossa as dolinas se devem ao desabamento de cavernas formadas por erosão interna ou *pipping,* em Jardim elas se devem à dissolução dos calcários. Contudo, na região de contato das duas formações, os dois mecanismos se sobrepõem e as dolinas são mais acentuadas e profundas. O fato mais importante aqui é que essas duas formas de erosão interna podem ocorrer simultaneamente. Pode-se ainda inferir que elas são fenômenos naturais devido à infiltração de água no solo e ao embasamento rochoso.

Neste capítulo, serão discutidas situações em que a erosão subterrânea está ligada ao fenômeno da infiltração de água no solo. As discussões acontecerão em torno da situação dos Cartes e do *pipping* excluída a existência de outros mecanismos e de situações intermediárias como os pseudocarstes, relatados por Albrecht (1998).

2 Erosão nas regiões cársticas

Os Carstes são formações geológicas constituídas basicamente por calcários ou outras rochas carbonáticas. A formação recebeu esse nome devido à região homônima na Europa, compreendida entre o norte da Itália, Eslovênia e Croácia. Nesse tipo formação, é comum o surgimento de dolinas e cavernas causadas pela dissolução da rocha. A formação dessa fisionomia deve-se à reação da água com a rocha.

A água de superfície se infiltra no solo e na rocha, de modo lento o suficiente para permitir a interação química do fluido com os cátions da rocha e do solo. Nesse processo de percolação e interação, ocorrem o destacamento e o arraste dos íons de cálcio. É importante enfatizar que o destacamento não se dá por processo físico, mas, sim, pela dissolução química da rocha.

A água de superfície é levemente acidificada pela reação com o dióxido de carbono (CO_2) disponível na atmosfera ou pela decomposição de materiais orgânicos acumulados em baixadas e depressões do terreno. O produto formado é uma solução de ácido carbônico (H_2CO_3) ou água ácida. Essa solução infiltra-se no solo, atravessando as suas camadas e chegando ao leito rochoso.

2 Texto aproximado da reportagem do programa Fantástico da Rede Globo que foi ao ar no dia 3 de março de 1996. A informação era de que nessa cidade surgiam alguns buracos que comprometiam a qualidade das construções.

Na geotecnia, as reações de dissolução são citadas por Souza (1978) como típicas do processo de intemperismo que forma os solos. A seguir, é ilustrada uma reação de dissolução que acontece com rochas compostas por carbonato de cálcio:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

Após o destacamento dos íons de cálcio, magnésio e outros íons alcalinos das rochas, acontece o arraste para posições mais baixas no perfil. O destacamento e o arraste dão origem a vazios e canalículos que são formadores de locais de fluxo preferencial. O fluxo intenso é responsável pela esqueletização da rocha. A formação de enormes vazios e de estruturas reliquiares impedem a rocha de desabar. Na base dessas estruturas, costuma ocorrer a deposição dos materiais transportados sob a forma de coloides, que formam um gel ao se depositarem. Outras vezes, esses materiais se solidificam e formam as estalagmites e estalactites nas cavernas. Outra característica interessante dessas cavidades é o acúmulo de água. Em geral, encontra-se sempre um depósito de água que, por vezes, pode chegar à metade do volume da cavidade.

Prandini (1990) instrumentou um grande número de poços profundos e instalou piezômetros e tassômetros em muitos locais na cidade de Cajamar. Seus estudos confirmam que, ao acionar o bombeamento nos poços, forma-se a subpressão nas cavernas e há recalques na superfície.

Santos (2006) afirmam que, ao extrair a água do subsolo em locais de rochas cársticas, pode-se acelerar o processo de formação das cavidades e forçar a queda de seu teto. Em outras palavras, a ação antrópica pode acelerar o processo de subsidência em função dessas erosões internas.

2.1 Erosões pseudocárstica em solos

Nesta seção, é apresentado um estudo de caso realizado na zona rural do Município de Jangada, que fica a noroeste de Cuiabá, no Mato Grosso. O local é uma grande várzea com declividade variando por volta de 0,2 m/km. A vegetação nativa é de campo com larga predominância de gramíneas. Em alguns locais, aparecem arbustos que são baixos, retorcidos e espinhosos e há poucas árvores.

A cidade de Jangada faz parte dos municípios que pertencem à Depressão Cuiabana. A região é uma planície cuja altitude média está por volta 140 m acima do nível médio do mar. À medida que se caminha para o leste, sul ou norte, encontram-se os limites naturais dessa planície numa distância que varia em torno de 150 km. Nas regiões limítrofes, a altitude pode passar dos 200 m. De um modo geral, a região é mal drenada devido à baixa permeabilidade do solo. Por outro lado, existe uma importante rede de drenagem superficial com córregos temporários escoando no período chuvoso. Ainda como consequência da baixa permeabilidade e do relevo plano, na época das chuvas formam-se muitos alagamentos, constituindo-se as várzeas e as lagoas que são típicas do pantanal mato-grossense.

As rochas do embasamento existentes nessa área são do Grupo Cuiabá e se constituem de rochas metamórficas, principalmente filitos, sericitos e meta-arenitos. Essas rochas exibem uma xistosidade forte, com ângulo de mergulho da ordem de 60º a 80º. Os filitos são rochas metamórficas cujo intemperismo é lento, o que gera materiais residuais jovens, os neossolos litóticos, que predominam na Baixada Cuiabana. A exposição desses materiais

jovens na superfície do terreno se deve ao fato de que a taxa de formação dos solos é menor que a taxa de erosão.

A composição estratigráfica do terreno, no local considerado, mostra que existem quatro camadas distintas de solo. A primeira camada tem espessura de aproximadamente 40 cm e cor cinza. A segunda camada tem cerca de 1 m de espessura e cor avermelhada. A terceira camada tem a profundidade entre 1,40 m e 1,75m e cor rosácea. A quarta camada tem a profundidade entre 1,80 m e 1,85 m e cor creme. A quinta camada é um solo saprolítico. Nas camadas sobrejacentes não se pode afirmar que o solo seja residual, uma vez que há uma linha de seixos, típica de solos transportados. Além disso, a área se constitui em baixio topográfico que acumula água de outras regiões mais altas. Em que pese à pequena declividade da superfície na região, esses seixos parecem ter vindo de uma posição cerca de 2 km a montante.

O fato de esses solos exibirem pH maiores que 7 induz a se pensar que são solos residuais jovens. Entretanto, a existência de uma linha de seixos que divide o solo saprolítico subjacente ao trecho erodido evidencia que tais solos são de fato transportados. A Figura 1 mostra uma foto do talude.

Figura 1. Estratificação do solo, tal qual visualizada no local.

Na Tabela 1, são exibidos os índices físicos do solo. As camadas 1 e 2 têm o índice de plasticidade (IP) de 8 e 10, respectivamente. A camada 3 tem o IP de 17. A camada 4 não exibe plasticidade, isto é, de um modo geral o solo é pouco plástico. Os solos da camada 1, 2 e 3 podem se classificar como ML e CL, respectivamente.

Tabela 1. Índices físicos do solo.

Propriedade	1ª	2ª	3ª	4ª
Profundidade(m)	0,10-0,40	1	1,40-1,75	1,40-1,85
Limite de plasticidade	15	14	20	N.P
Limite de liquidez	23	40	43	N.P
Índice de plasticidade	8	10	17	N.P
Peso específico natural (kN/m^3)	16,38	16,76	15,31	23,54
Teor de umidade natural (%)	0,74	0,8	0,12	0,62
pH	8,53	9,41	9,49	8,8
Sucção (MPa)	36	32	30	27

Outro fato importante a ser observado na Tabela 1 são os valores de sucção, da ordem de 30 MPa, e umidade natural próxima de zero. Essas medidas foram realizadas em um período seco – mês de agosto – já que no período chuvoso o solo fica sob a água acumulada no local. Valores de sucção tão elevados são típicos de solos com baixa porosidade e elevado teor de argila. Essa relação de infiltração e erosão com a sucção já foi estudada no capítulo que trata da infiltração em solos não saturados.

Um fato importante aqui é a caracterização da água reunida no local durante os meses do período chuvoso, o que pode indicar se ela está ou não acidulada e qual a origem da acidez. A análise do pH da água indicou valores da ordem de 6,2. Essa leve acidez é oriunda dos ácidos húmicos e fúlvicos presentes na decomposição da matéria orgânica que fica submersa no local.

Por outro lado, o solo apresentou pH da ordem de 9. Essa situação já traz uma visão preliminar da possibilidade de ocorrência das reações de dissolução. A presença de água acidulada sobre solos contendo minerais alcalinos pode gerar uma reação de dissolução. Para tanto, fez-se necessária a identificação de alguns elementos químicos presentes no solo. A Tabela 2 mostra a composição química média desse solo, para cada uma de suas camadas. Na Tabela, pode ser observado que o teor de cálcio e magnésio é baixo para a indicação do solo como sendo cárstico. Por outro lado, as quantidades de sódio chamam a atenção.

Tabela 2. Teores de cátions e pH encontrados no solo.

Propriedade do solo	**Camada 1**	**Camada 2**	**Camada 3**	**Camada 4**
pH	8,53	9,41	9,49	8,8
Teor de Sódio (mg/dm^3)	48,8	81,5	97,7	57,6
Teor de Potássio (mg/dm^3)	22,6	68,1	68	58,4
Teor de cálcio (mg/dm^3)	1,07	0,57	0,45	1,18
Teor de Magnésio (mg/dm^3)	0,24	1,3	2,42	1,18
Teor de Fósforo (mg/dm^3)	3,4	0,8	1	0,7
Teor de Ferro (mg/dm^3)	67	56	45	75

A difração de raios X mostrou que os minerais presentes são o quartzo, a ilita, a vermiculita, a montimorilonita sódica, a albita e anortita. O quartzo é um mineral bastante estável, enquanto os demais minerais são ricos em sódio e cálcio. Tais informações coadunam com as análises químicas. De modo particular, as albitas e anortitas são conhecidas como feldspatos calcossódicos devido ao seu elevado teor de cálcio e sódio.

Alguns minerais são mais ativos que outros na reação com água. Essa reatividade pode dar origem ao comportamento dispersivo observado em amostras do solo que foram compactadas ou mesmo naquelas amostras indeformadas que foram ensaiadas na condição de imersão. Além disso, a presença de elementos alcalinos em águas aciduladas pode ensejar a ocorrência de reações de dissolução.

O mecanismo de reação da água levemente acidulada com os hidróxidos alcalinos presentes na composição do solo gera a formação de alguns géis que são carreados para posições inferiores no perfil de solo.

Nas regiões onde há um desaguamento, é possível ver o talude do terreno escavado. Dois aspectos chamam a atenção: a existência de um material branco, fino e endurecido nas regiões

mais baixas do perfil e uma porosidade na direção vertical como canalículos que ligam o topo do perfil ao extrato rochoso. A Figura 2 mostra esses dois aspectos.

Figura 2. Aspectos do talude do material escavado pela erosão: (a) canais abertos pela retirada do material; (b) material depositado nas áreas mais baixas do terreno.

As reações de dissolução são tipicamente observadas nas obras civis. Silva (1999) relata essa situação em eflorescência de alvenaria. Veiga *et al.* (1997) fazem uma descrição dessa reação no concreto que pode ser bem assemelhada ao que ocorre nos solos de Jangada. Eles relatam a deposição dos géis e descrevem todas as reações em detalhes. Nesse caso, as condições geológicas se assemelham às condições químicas dos materiais artificiais, como evidenciado na Figura 2(b).

A classificação MCT mostra que os solos das três primeiras camadas têm comportamentos saprolíticos. Entretanto, a presença da linha de seixos e a mudança da estrutura do solo indicam que esses solos são transportados. Outro dado importante da classificação é o enquadramento granulométrico do solo como argila em todas as camadas. Isso diverge da classificação SUCS, que aponta as duas camadas mais superficiais como sendo de silte pouco plástico. Na última camada, o método MCT mostrou um solo argiloso laterítico, enquanto o SUCS mostrou silte pouco plástico. A Tabela 3 mostra os resultados da classificação dos solos.

Essa classificação leva o solo a ser assumido como erodível nas três primeiras camadas por não possuírem comportamento laterítico. Conforme Nogami e Villibor (1995), solos de comportamento saprolítico são erodíveis e, dessa forma, apenas o solo da última camada não seria erodível. Entretanto, a Figura 2 mostra a erosão também nessa camada. Paradoxalmente, apenas a camada saprolítica (a base da sequência exposta) não sofre erosão mensurável nesse processo.

Tabela 3. Classificação do solo no sistema MCT e SUCS.

Propriedade do solo	**1**	**2**	**3**	**4**
d'	3,33	33,3	10	33,33
e'	1,82	0,87	0,87	1,26
Perda de massa	5,20	6,57	1,71	4,14
Classificação MCT	NG'	NG'	NG'	LG'
Classificação SUCS	ML	ML	CL	SM

É importante estabelecer que a classificação MCT faz uma previsão acertada em relação à erodibildidade do solo. Nogami e Villibor (1995) chamam a atenção para o fato de que os solos apresentam comportamento saprolítico, não que de fato o sejam.

Outro fato importante é associação do ensaio de perda de massa por imersão com a dispersibilidade do solo. Neste estudo em Jangada, comparou-se o resultado de perda de massa por imersão com resultados de ensaios de dispersão realizados por Conciani e Gomes (2009). Os resultados dos dois grupos de ensaios são sempre convergentes, confirmando o caráter dispersivo do solo. Essa informação é também compatível com o teor de sódio encontrado no solo, mostrado na Tabela 3.

O mecanismo de dissolução atua abrindo os primeiros e minúsculos poros, tal como relatado por Veiga *et al.* (2008). No momento seguinte, o processo de dispersão é mais forte, pois a quantidade de água aumenta muito. A condição de dispersão é agravada pela quebra da estrutura e perda da coesão causada pelo elevado valor de sucção mátrica. Ao sofrer a perda de sucção, o solo sofre também a expansão, já que os minerais identificados, com exceção do quartzo, são todos expansivos. Bordeaux e Nakao (1974) afirmam que os fatores químicos devem sempre ser considerados, uma vez que os solos dispersivos são tipicamente erosivos.

3 Erosão por *pipping*

Conforme citado inicialmente, a subsidência também pode acontecer devido à erosão por *pipping*. Esse é o caso da erosão relatada por Ridente Júnior e Fornasari (1998), a qual levou grandes áreas urbanas a sofrerem processos de subsidência, com perda de infraestrutura e prejuízos sociais e financeiros.

Para Camapum de Carvalho *et al.* (2006), além dos fatores externos que atuam na erosão superficial do terreno, existem os fatores internos como gradientes críticos de escoamento, desagregabilidade e erodiblidade do solo. Para esses mesmos autores, a erosão interna é decorrente principalmente da formação de gradientes hidráulicos críticos no maciço de solo, os quais são capazes de remover as partículas menores através dos poros de uma matriz de dimensões maiores. Para Bordeaux e Nakao (1974), a dispersão é um fator a ser considerado.

O processo de erosão subterrânea é comum em solos porosos ou com distribuição granulométrica bimodal (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006). Nesses solos, a percolação interna é intensa e desenvolve gradientes hidráulicos elevados, os quais são capazes de exceder a resistência ao cisalhamento do solo e arrancar suas partículas. Morais *et al.* (2004) relatam a ocorrência dessa forma de erosão em solos saprolíticos de gnaisse. Há também relatos por outros pesquisadores de ocorrência dessa forma de erosão em barragens.

O *piping* ou entubamento é uma forma de erosão que ocorre internamente ao solo. Na superfície do terreno parece que não existe erosão; entretanto, no interior do maciço de solo está ocorrendo uma remoção de partículas, que são carreadas por força de percolação da água. Nos locais onde as partículas são retiradas, formam-se tubos ou canais subterrâneos. Por isso, essa forma de erosão é também chamada de entubamento. De uma forma geral, a erosão interna precisa de uma superfície livre para que o material destacado seja removido do maciço. Contudo, não é uma condição *sine qua non*.

A erosão interna ocorre principalmente em solos arenosos onde se formam gradientes de pressão de água (pressão neutra ou poro-pressão) capazes de remover as partículas. Quando os gradientes de pressão neutra excedem o peso das partículas, ou as forças que atuam sobre elas, ocorre a remoção. Como as partículas pequenas são removidas da matriz de solo, Camapum de Carvalho *et al.* (2006) relatam a condição de solos bimodais como necessária

para a ocorrência desse tipo de erosão. Na parte do solo onde ocorre a surgência, tem início um processo de escavação que caminha para dentro do maciço. A Figura 3 mostra um talude de voçoroca onde o fenômeno está bastante claro.

Figura 3. Entubamento ocorrendo nas paredes de uma voçoroca. Observar que há uma linha preferencial para a ocorrência dessa forma de erosão (foto de Isernhagen, 2003).

A explicação físico-matemática desse fenômeno se dá pelo equilíbrio de forças agindo na partícula de solo no interior de um maciço saturado. A erosão interna ocorre porque a força peso de solo e/ou a resistência ao cisalhamento são superadas pela força de percolação da água. Para a verificação do fenômeno basta observar a existência de gradientes hidráulicos críticos.

Considerando-se que a situação de equilíbrio de forças de corpos submersos deve levar em conta o empuxo hidrostático (empuxo de Arquimedes), pode-se considerar que o peso de solo deve ser o peso submerso ($P_{buy} = \gamma_{buy} L . A = (\gamma_{sat} - \gamma_w) L A$). Assim, o gradiente hidráulico crítico tem seu valor numérico igual ao peso específico do solo submerso. Toda vez que se constatar um gradiente hidráulico maior que o crítico, o solo estará sujeito à erosão interna.

Conforme demonstrado por Lima (2003), a infiltração de água no solo causa a lixiviação de argilominerais, fato que ora carreia ora deposita sedimentos nessas zonas, influenciando o processo erosivo.

Em que pese à propensão granulométrica e necessidade de gradientes críticos, alguns ensaios ajudam a identificar os solos com potencial para a ocorrência de erosão interna.

4 A prospecção de áreas atingidas pela erosão subterrânea

A detecção de erosão subterrânea pode ser feita por meio de observações de campo. Em geral, ocorrem furos por onde a água some ou algumas edificações sofrem recalques inexplicáveis. O uso de métodos indiretos para a avaliação de processos erosivos não é novo. Silva (2002) empregou o GPR para estudar os processos erosivos no norte do Estado de Mato Grosso. Albrecht (1998) recomenda o uso de métodos geofísicos gravitacionais para avaliar o potencial e a ocorrência desses fenômenos erosivos não observáveis a olho nu em áreas da dimensão de cidades e municípios.

A Figura 4 mostra uma situação de erosão em região de campo nativo do Estado de Mato Grosso, onde a erosão subterrânea aflora e possibilita a observação *in situ*. As diversas

escavações observadas nessa figura são interligadas pelo fundo. O surgimento das escavações na superfície se deu pela queda do seu teto. Um aspecto interessante na situação é a de que a erosão está dentro de uma área não antropizada, isto é, a influência humana não se faz sentir.

Figura 4. Processo erosivo subterrâneo que aflora em diversos pontos de uma área de campo nativo em Mato Grosso.

Silva *et al.* (2008) relatam que o estudo da área foi realizado empregando-se métodos eletrorresistivos. Dentre os métodos de investigação indireta, a eletrorresistividade se destaca pela facilidade de aplicação e rapidez na obtenção dos resultados. Além do caminhamento elétrico, técnica descrita neste trabalho, utilizando o arranjo Wenner, destaca-se também o arranjo Schulumberger, destinado às avaliações em profundidade, portanto denominado SEV, sondagem elétrica vertical.

Trabalhos como os de Davino (1970), Malagutti (1991), Braga (1997), Cutrim (1999), Elis (1998) e Silva (2002) demonstram a busca da aplicabilidade desse método no Brasil, buscando sua identidade com as condições tropicais. A eletrorresistividade do solo depende basicamente da qualidade de água presente nos vazios (poros e fraturas), sólidos totais dissolvidos na água, a porosidade e, por fim, a composição mineralógica.

Na Tabela 4, pode-se observar faixas de variações mais frequentes nos valores de resistividade e cargabilidade (maior ou menor capacidade que os materiais da terra têm de se polarizarem, cujo parâmetro medido no domínio do tempo recebe esse nome, o que pode

Tabela 4. Valores esperados de resistividade e cargabilidade para alguns solos, de acordo com Braga (sd).

Tipo litológico	Cargabilidade (mV/V)	Resistividade (Ω.m)
Zona não saturada	0,4-23,4	100-30.000
Argiloso	1,5 – 1,9	≤20
Argilo-arenoso	1,5 -1,9	20-40
Areno-argiloso	7,1 – 45	40-60
Siltito-argiloso	7,1 – 45	10-60
Siltito-arenoso	0,1 -5,8	10-60
Arenoso	0,1 -5,8	≥60
Argilito	1,5-1,9	10-20
Arenito	0,1-5,6	80-200
Basalto/ diabásio	20,0 – 30,0	200-500
Calcário	20,0 – 30,0	500-1.000
Granito / gnaisse	10,0 – 20,0	3.000-5.000

ser medido, dependendo do aparelho, em miliVolt/Volt) para alguns tipos de sedimentos e rochas. Na Tabela 4, pode-se observar a enorme variabilidade que caracteriza esses materiais.

A resistividade de um material é dada pela lei de Ohm, e o seu valor é diretamente proporcional à resistência à passagem do fluxo de cargas elétricas, dada pela razão entre a diferença de potencial entre dois pontos e o fluxo que atravessa esse percurso, e pela razão entre a área disponível para que a corrente flua e a distância medida pelo trajeto percorrido pela corrente.

Não se pode esquecer, no entanto, que o maciço de solo é heterogêneo. Ao injetar corrente elétrica nesse meio, os valores de comprimento e área serão desconhecidos, principalmente porque os materiais se acomodam em mais de uma camada. A configuração eletródica utilizada por meio da cravação de quatro hastes metálicas no solo oferece a possibilidade da substituição dos valores por uma constante que depende dessa configuração. Nessas condições, o resultado obtido passa a ser uma referência ao pacote de solo envolvido na medição, sendo considerada a resistividade média do pacote. A Equação 1 permite a determinação do fator K.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad (1)$$

em que: AM, AN, BN e BM são as distâncias entre os eletrodos.

Considerando Z a profundidade teórica de investigação e L a separação entre os eletrodos de corrente, para uma determinada separação, à medida em que a relação Z/L aumenta, o percentual de corrente verificado diminui, segundo a Equação 2 (TELFORD *et al.*, 1990).

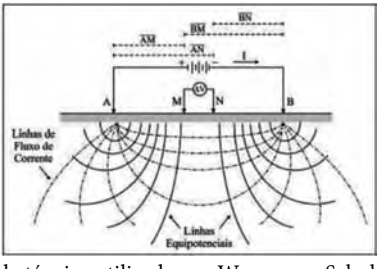


Figura 5. Esquema de ligação da técnica utilizada por Wenner ou Schulumberger. Na técnica de Wenner, as distâncias AM, MN e NB entre os eletrodos é a mesma.

$$Z = \frac{4I}{\partial^2} \quad (2)$$

Para se investigar uma determinada profundidade, é necessário, em geral, que o espaçamento entre os eletrodos de corrente seja maior do que a profundidade. Além da configuração dos eletrodos, a profundidade de investigação nos métodos elétricos é influenciada por diversos fatores: ruídos naturais e artificiais; heterogeneidades geológicas laterais; topografia da superfície e do substrato geológico; presença de camadas finas de resistividades distintas, entre outros. Desse modo, a profundidade de investigação teórica, frequentemente, não expressa a profundidade observada. Alguns autores, por meio de experimentos em laboratório e campo, identificaram relações de profundidade de investigação *versus* configuração eletródica para o arranjo Schlumberger. A Tabela 5 reúne algumas das relações entre a distância e as profundidades investigadas.

Faz-se aqui um relato do estudo citado na seção 2.1. Para aquele trabalho, adotou-se o afastamento horizontal entre os eletrodos de 1 m, 2 m e 3 m. respectivamente. Com esse es-

paçamento, procurou-se estudar o solo em profundidades próximas dessas magnitudes, uma vez que essa é a região onde o processo erosivo estava mais evidente. Os eletrodos do aparelho foram introduzidos a uma profundidade de 0,15 m no solo. O alinhamento foi repetido a cada 3 m, em linhas paralelas, por uma extensão de 42 m. Foram executados ensaios em linhas, em 15 pontos centrais de investigação, afastados de 3 m entre si. A primeira das SEV´s foi executada a 2 m da voçoroca. Em seguida, usando uma linha perpendicular à cabeceira da voçoroca, passou-se a localizar os centros de investigação, afastando-se da voçoroca, de três em três metros. A Figura 6 ilustra esse esquema de investigação. Os ensaios foram conduzidos no mês de outubro, que corresponde ao período da seca.

Tabela 5. Abertura dos eletrodos para investigação em profundidade.

Autores	Profundidade de investigação
Roy e Apparao (1977)	0,1125 L
Barker (1989)	0,190 L
Telford *et al.* (1990)	0,167 L'

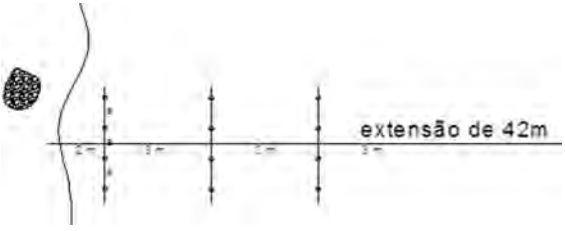


Figura 6. Esquema de distribuição dos ensaios ao lado da voçoroca.

Os dados levantados em campo são apresentados na Figura 7, na qual se pode observar a variabilidade dos valores de resistividade em profundidade, ao longo do caminhamento investigado. Essa figura chama a atenção para o fato de que não há um padrão claro de variação nas profundidades de 1 m e 2 m. Poder-se-ia esperar que as elevações e quedas dos valores de resistividade acontecessem sempre na mesma posição. Isso não ocorreu, embora seja possível afirmar que as sinuosidades das linhas de resistividade ao longo do percurso investigado sejam próximas em alguns casos. Também é possível afirmar que, de um modo geral, as magnitudes da eletrorresisitividade são maiores à medida em que se aproxima da superfície. Uma explicação para isso é o teor de umidade do solo – maior na medida em que se aprofunda o perfil.

Os valores típicos de resistividade do solo apresentados na Tabela 4 mostram que, para solos argilosos secos, os valores esperados são menores que 20. Na Figura 7, pode-se verificar que os valores medidos no campo atingem no máximo 30 **Ω**m. Os valores encontrados na profundidade de 3 m são da ordem de 10 Ωm. A queda de valores tem duas possíveis explicações. A primeira explicação é um aumento no teor de umidade. Isso é possível se for considerado que, nas camadas mais profundas, há menor variação de umidade devido à evaporação. A segunda explicação é que esse valor coincide com o limite inferior dos siltitos argilosos. O embasamento rochoso no local é constituído de filitos, sericitos e siltitos; a textura do silte é dominante em todas essas rochas. Isso quer dizer que os dois fatores podem estar concorrendo para a variação de resistividade elétrica na região.

Se for considerado que nas distâncias de 15 m e 30 m (Figura 7) o valor da resistividade sobe, respectivamente, para 20 Ωm e 10 Ωm , tem-se uma possível mudança de solo, ou de massa nesses locais.

Para o tratamento dos dados, foi empregado o programa computacional Surfer®. Construiu-se um gráfico com linhas isorresistivas ao longo da secção em que foram realizadas as SEV. A Figura 7 mostra a secção de solo estudada. Na figura, pode-se observar que há regiões com valores de eletrorresistividade elevados em relação aos valores médios do maciço.

Considerando que o ar não conduz eletricidade, pode-se dizer que quanto maior o volume de vazios de um solo, maior será a sua resistividade. Dessa forma, é de se supor que as regiões em que os valores de resistividade crescem são aquelas em que o solo está perdendo massa, ou ainda que essas regiões sejam aquelas em que o solo está mais seco.

Na Figura 8, observa-se que as regiões em que a resistividade é maior são agrupadas aleatoriamente. Em outras palavras, o aumento da umidade com a profundidade não se reflete na distribuição da eletrorresistividade, que deveria diminuir ao longo da profundidade. A concentração de valores de elevada resistividade pode ser observada, por exemplo, nas distâncias de 2,5 m; 17,5 m; 27,5 m; 30 m e 36 m. As concentrações de valores reúnem linhas de isovalores que não têm o mesmo formato nem estão na mesma profundidade.

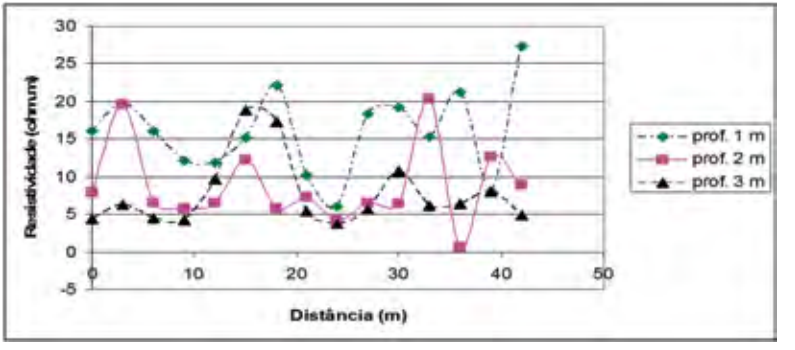


Figura 7. Variação da resistividade (Ohm-metro) medida em subsuperfície, ao longo da secção ensaiada.

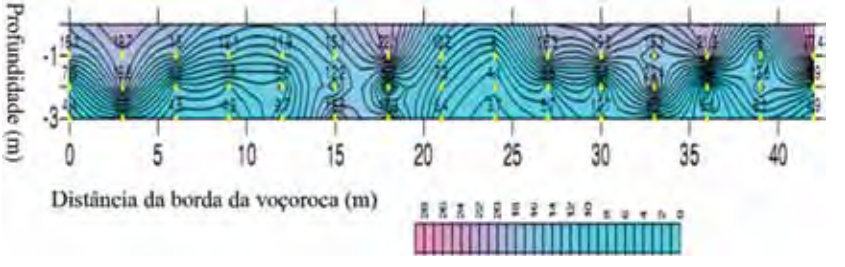


Figura 8. Perfil eletrorresistivo do solo na secção estudada (resistividades em Ohm-metro).

A região de concentração de valores elevados observada na parte esquerda da Figura 8 (distância de 2,5 m) mostra que os valores de eletrorresitividade estão por volta de 19,6 Ωm e na profundidade de 2 m. Nesse local a região crítica forma um sino invertido de base alargada. Já na extremidade direita desta figura, o valor da eletrorresistividade atinge 27,4 Ωm; está na profundidade de 1 m e tem a forma de sino invertido com base estreita. A forma

de sino não está presente, por exemplo, na distância de 30 m, onde a região de valores mais elevados é difusa.

Esses fatos permitem inferir que, sob a superfície do terreno, existem regiões com maior ou menor quantidade de matéria sólida. Nas regiões onde há menor concentração de matéria sólida, admitiu-se a existência de cavidades abertas ou em formação. A Figura 9 mostra um furo de erosão existente no solo em uma posição transversal à linha ensaiada. Na foto, pode-se inferir a profundidade e largura da cavidade gerada pela erosão.

Figura 9. Inferência empírica da dimensão da escavação feita pela erosão subterrânea.

O trabalho de campo mostrou a possível configuração da erosão no local. Contudo, nas situações de projetos ou estudos preliminares para a implantação de empreendimentos de urbanização, interessa saber se o solo pode ou não estar sujeito a esse fenômeno e não quanto ele foi atingido. Para isso, alguns ensaios de laboratório podem ajudar. Aqui são citados alguns deles.

Usando o solo do local em Jangada, MT, foram realizados ensaios de erodibilidade com aplicação do método MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) de classificação do solo. Esse método foi desenvolvido por Nogami e Villibor (1985) e está padronizado pela norma DNER ME 228/94 . A classificação MCT é baseada nos resultados de ensaios de compactação e miniatura. Um dos ensaios do método é a imersão, em água, dos corpos-de-prova de solo compactado. O ensaio avalia a dispersibilidade do solo.

Esses ensaios foram complementados por ensaios penetrométricos, conforme recomendado por Alcântara e Villar (1998). Esses pesquisadores desenvolveram um método de avaliação da erodibilidade que se baseia na influência da água na resistência do solo. Para isso, compara-se a resistência à penetração de um cone no solo saturado por ascensão capilar com a mesma amostra antes da inundação. No caso do solo de Jangada, Conciani e Gomes (2009) encontraram uma diferença de resistência muito grande, o que caracterizou o solo como erosivo.

Bordeaux e Nakao (1974) recomendam o emprego de ensaios químicos para a avaliação da dispersibilidade do solo. Os ensaios realizados determinam a composição de alumínio, ferro, sódio, cálcio, magnésio, sódio e potássio. Todos os teores desses cátions são determinados em termos de composição total e não de cátions livres. A ideia do uso desses ensaios é detectar a presença de elementos dispersivos e solúveis, como no caso dos Carstes. Conciani e Dias (2011) também mostraram que os elementos químicos que reagem com a água infiltrada se fizeram presentes.

4.1 Previsão por ensaios físicos de laboratório

Uma forma de prever o acontecimento deste dano causado pela infiltração de água no solo é a realização de ensaios do tipo *pin hole.* Estes ensaios consistem em fazer a água passar por uma amostra de solo em um furo de pequeno diâmetro. Se o solo for susceptível de sofrer erosão interna a água efluente trará partículas de solo. Assim, quanto maior for a turbidez da água efluente maior será o potencial de problemas causados pela infiltração de água no solo.

Nesta mesma linha de pensamento há o ensaio padronizado com o nome de *crumb test*. Este ensaio consiste em colocar um torrão de solo imerso em um recipiente com água e observar a sua desagregação. Os solos que se desagregam de forma imediata ou muito rápida são susceptíveis de sofrerem danos devido a infiltração de água no terreno.

5 Síntese

A infiltração de água no solo é um benefício desejável vez que alimenta os aquíferos, reduz o caudal superficial que gera erosão e mantém as características hídricas e da biota do solo que propiciam as condições de cultivo agrícola ou de sustentação da vegetação nativa. Nas regiões urbanas ou rurais a infiltração de água no solo é usada como um recurso tecnológico para controle de cheias e de erosão.

Para alguns solos e regiões a infiltração traz consigo algumas dificuldades. Neste caso, devem ser incluídas as regiões cársticas e de solos colapsíveis, friáveis ou dispersivos. Os impactos danosos da infiltração nestas condições podem se fazer sentir em diferentes situações naturais ou antropisadas.

O modelo de paisagem com grutas e cavernas é desenhado pela infiltração de água no terreno independente da ação humana. De outro lado, a execução de obras de engenharia pode agravar algumas feições geológicos. Também é importante lembrar dos efeitos da infiltração de água no solo no caso de barragens e escavações tais como cortes de taludes rodoviários, abertura de valas e poços para fundações dentre outros.

Em uma frase pode -se afirmar que todos os fenômenos tem efeitos benéficos ou danosos a depender da situação em que se encontra ou da interferência que se propõe.

Referências bibliográficas

ALBRECHT, K. J. (1998) Avaliação geológica-geotécnica de terrenos sujeitos a problemas cársticos. São Carlos: USP. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo - São Carlos, SP.

Alcântara, M. A. T. ; Vilar, O. M. (1998). Aplicação de métodos de análise para a avaliação da erodibilidade de alguns solos do estado de São Paulo. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO.** Presidente Prudente. ANAIS EM CD.

BARKER, R. D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. Geophysics, Número 54. p. 1031-1037.

BORDEAUX, G.; NAKAO, H. (1974). Ensaios sobre argilas dispersivas. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 5, São Paulo, SP. Anais. v. 2, p. 145-155.

BRAGA, A. C. de O. (1997). Métodos geoelétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP. Tese (Doutorado em Geologia) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro, SP. 169 p.

BRAGA, A. C. O. (SD). Métodos geoelétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica. Notas de aula. Rio Claro, SP: UNESP.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES. M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. (2006). Processos Erosivos. *In:* CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SOUZA, N. M. de; MELO, M. T. S. (Orgs.). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília: UnB-FINATEC. p 39-92.

CARVALHO, C. (1997). Gerenciamento de riscos geotécnicos em encostas urbanas: uma proposta baseada na análise de risco. São Paulo: USP. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Programa de Pós-graduação em Fundações da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.

CONCIANI, W.; DIAS, M. C. (2011). Avaliação da erodibilidade de um solo de várzea pelo método MCT, ensaios químicos e mineralógicos. *In:* SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, Brasília, DF. Anais.

CONCIANI, W. E.; GOMES, V. F. (2009) Aplicação do método penetração de cone para avaliar a erodibilidade de um solo de várzea. *In:* SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, Uberlândia, MG. Anais CD-ROM.

CUTRIM, A. O. (1999). Estudos hidrogeológicos na Bacia do Paraná, no Município de Rondonópolis. Cuiabá: UFMT. 204 p. Tese (Doutorado em Física e Meio Ambiente), Instituto de Biociências, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT.

DAVINO, A. (1970). Importância do método de eletroresistividade na determinação da natureza do manto de decomposição de rochas. Geociências e Ciências Exatas. Tese (Doutorado em Geologia), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 264 p.

ELIS, V. R. (1998). Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. *In*: Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia. v. 19, São Paulo, SP: SBG. p. 933-935.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto à voçorocas. Brasília: UnB. 336 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-017 A/03.

MALAGUTTI FILHO, W. (1991). Utilização de técnicas geofísicas na caracterização de solos e rochas com aplicações na geologia de planejamento urbano. Rio Claro: UNESP. Tese (Doutorado em Geologia), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 2 v.

NOGAMI, J. & VILLIBOR, D. F. (1995) Pavimentação rodoviária de baixo custo. São Paulo: Edições Villibor. Pg 30-50.

ORELLANA, E. (1972). Prospeccion geolectrica en corriente continua. Madrid: Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips. 523 p.

PRANDINI, F. (1990). O Carste coberto de Cajamar. Vídeo. São Paulo: IPT.

RIDENTE JÚNIOR, J. L.; GAMA JÚNIOR, G. F. C.; GOMES, C. L. R. & IWASA, O. Y. (1998). Plano de obras de controle de erosão urbana nas bacias dos córregos Limoeiro e Cedro (Presidente Prudente & Álvares Machado. *In:* SIMPÓSIO NACIONAL DE PROCESSOS EROSIVOS, Presidente Prudente. Anais eletrônicos.

ROSA, L. P.; LACERDA, W. A. (1997). Tormentas cariocas. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ Ed. 162 p.

ROY, A.; APPARAO, A. (1977). Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, v. 36, n. 5, p. 943-959.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. (2008). Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). Revista Brasileira de Geociências. Disponível em: http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/article/view/11408. Acesso em:29.04.2012.

SANTOS, A. R. (2006). Geologia de engenharia: conceitos, método e prática. Campinas: Ed. O Nome da Rosa. Caso de aplicação número 7. 208 p.

SILVA, W. (1999) Os sais solúveis nos materiais de construção na cidade de Campina Grande. Dissertação de mestrado apresentada ao Depto de Eng. Civil e Ambiental da UFPB - Campina Grande.

SILVA, L. A. (2002). Metodologia geofísica através de SEV e GPR para a caracterização pedológica de uma vertente, associada a processo erosivo linear – Um exemplo no município de Sorriso-MT. Campina Grande: UFCG. 258p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

SILVA, L. A.; MOTA, L.; CONCIANI, W. (2008). Aplicação de sondagem elétrica por meio da técnica do caminhamento elétrico, para investigação do solo, numa região de erosão, em Jangada – MT. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Búzios. Anais eletrônicos. 7 p.

SOUZA, M.L. (1978). Pavimentação rodoviária. Rio de Janeiro: Livro Técnico e Científico.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990). Applied geophysics. 2nd ed. United Kingdom: Cambridge University Press. 770 p.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; ANDRADE, N. P. H (1997). Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. *In:* SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, Goiânia, GO. Disponível em: http://engipapers.com.br/artigos/00151DURA1997.pdf. Acesso em:Acesso em:29.04.2012.

Capítulo 30

Produção de carta geotécnica preliminar de capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica Corumbá IV (GO)

Wagner Santos de Almeida
Newton Moreira de Souza
José Camapum de Carvalho

1 Introdução

Uma das principais preocupações da sociedade contemporânea diz respeito à escassez de água e à necessidade de otimização do seu uso. A água utilizada é comumente acumulada em reservatórios que servem ao abastecimento humano e agropecuário e à geração de energia elétrica. Se por um lado o escoamento superficial excessivo da água da chuva quase sempre dá origem a processos erosivos, por outro, o solo erodido deposita-se nos reservatórios, gerando o seu assoreamento e diminuindo a sua capacidade de armazenamento e a sua vida útil. Logo, a avaliação desses processos permite colocar em evidência a necessidade de se promover a infiltração das águas pluviais, de modo a otimizar a vida útil e a capacidade de acumulação dos reservatórios. Para a caracterização e análise do problema, foi selecionado o reservatório da hidrelétrica (UHE) de Corumbá IV.

O reservatório da usina hidrelétrica (UHE) de Corumbá IV abrange uma área de 173 km^2 e situa-se no curso principal do rio Corumbá, no Município de Luziânia (GO), em uma área do bioma de cerrado. A construção e o gerenciamento da UHE Corumbá IV atuam como um permanente modificador dos elementos que conformam a hidrografia local, com efeito desestabilizador sobre o equilíbrio natural, o que gera condições para a ocorrência de impactos ambientais, sociais e econômicos.

A construção da barragem, por si só, bem como a formação do seu reservatório, normalmente, já modifica as condições naturais do curso d'água. O reservatório torna-se um meio natural de retenção de sedimento afluente que altera, substancialmente, a capacidade de infiltração dos solos situados no entorno do reservatório, além de reduzir a velocidade da corrente fluvial, o que acarreta o seu assoreamento gradual.

As barragens de usinas hidrelétricas, em geral, são afetadas não só por processos de desmatamento, mas também, como no caso da UHE de Corumbá IV, pela expansão do cultivo mecanizado de certas culturas agrícolas sem os devidos cuidados com a conservação do solo, o que modifica sua capacidade de infiltração. Os processos de desmatamento potencializam os processos erosivos laminares, devido ao aumento do impacto das gotas de chuva, que não serão mais amortecidas pelas folhas, e ao ressecamento do solo, o que facilita a desagregação e o transporte do material terroso. Essas situações provocam o assoreamento dos mananciais das bacias hidrográficas contribuintes, além do agravante de os cursos d'água tributários apresentar contaminações por fertilizantes e agroquímicos, em geral, devido à agricultura mecanizada.

A capacidade de infiltração é afetada pela erosão laminar e pela deposição de sedimentos. Esses dois processos estão diretamente ligados à dinâmica da bacia hidrográfica abastecedora do reservatório e, como consequência, afetam o potencial de geração de energia elétrica ao diminuir a vida útil do reservatório.

O emprego de modelos empíricos, como a Equação Universal para Perda de Solos (doravante EUPS) (EUPS), permite, por meio da produção de cartas geotécnicas, avaliar a erosão laminar potencial e realizar a sua representação cartográfica. Dentre os produtos intermediários para a produção dessas cartas geotécnicas, estão os mapas de zonas homólogas e de uso e cobertura do solo. Os primeiros permitem a reclassificação das características fisiográficas do terreno quanto a sua geomorfologia e a sua pedologia. O mapa de uso e cobertura do solo traduz, por sua vez, as interferências antrópicas na paisagem, que são as de maior peso na gênese de processos erosivos laminares, também afetam a capacidade de infiltração dos solos e podem ser obtidos por meio da utilização de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento.

Por sua vez, a EUPS pode ser operada em um ambiente computacional de geoprocessamento, por análise espacial, com aplicação de técnica de álgebra de mapas, em uma integração lógica de dados oriundos das unidades de relevo, da sua geomorfologia, da sua pedologia, da sua vegetação, da sua pluviometria, do uso e da cobertura do solo, aí se inserindo um conhecimento prévio da área de estudo quanto aos aspectos físico, biótico e ambiental.

A erosão laminar tende a ser maior quanto maior for o escoamento superficial, que, por sua vez, é maior quanto menor for a infiltração. De uma forma intuitiva, pode-se dizer que a capacidade de infiltração de um solo possui uma relação inversa com relação à perda de solo obtida pela EUPS. No entanto, essa relação não obedece necessariamente à mesma relação de proporcionalidade para todos os fatores que a compõem. Simplesmente dizer que quanto maior perda de solo obtida pela EUPS menor será a capacidade de infiltração pode levar a equívocos se não for analisado cada um dos fatores nas condições regionais que foram aplicadas.

Assim, este capítulo introduz a discussão do tema fazendo uma análise preliminar dos fatores que compõem a EUPS no sentido de se fazer um modelo de capacidade de infiltração em potencial, que pode ser representado cartograficamente, em uma área no entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV, no Município de Luziânia (GO), e compará-lo com os valores de perda obtidos pela EUPS. Como até o momento não existe uma avaliação quantitativa que permita se obter um valor absoluto da capacidade de infiltração a partir da metodologia proposta, optou-se por uma avaliação qualitativa. Para isso, cada fator analisado deverá ter um valor relativo de zero a 100% que corresponda a sua influência na capacidade de infiltração da água no solo e for operado por uma média ponderada simples.

2 Área de estudo

A área de estudo está situada entre as coordenadas geográficas de 16º 18’ e 16º 28’ de latitude sul e 048º 13’ e 048º 19’ de longitude oeste, entre as bacias do ribeirão Sarandi e do córrego Pirapitinga, contribuintes do reservatório da UHE Corumbá IV, localizada no Município de Luziânia (GO). A escolha por essa área deve-se ao fato de ela possuir ocupação antrópica nas áreas de proteção permanente (APP) e significativas variações de declividade, além de apresentar um desmatamento recente acentuado.

A Figura 1 apresenta graficamente a localização da área de estudo.

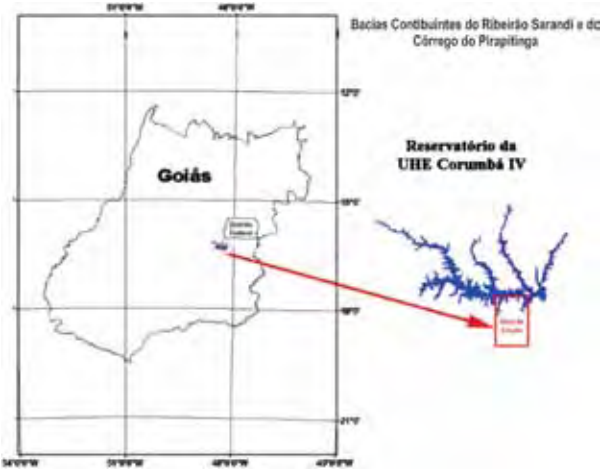


Figura 1. Representação gráfica da área de estudo.

3 Materiais e métodos

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Materiais para produção dos modelos numéricos de terreno (MNT)

O modelo numérico de terreno (MNT) utilizado apresenta dados de altitude obtidos por interferometria radar da missão SRTM (*Shutlle Radar Topographic Mission)*, de 1999, com resoluções planimétrica de 90 metros e altimétrica de 15 metros. Esses dados, segundo Rodriguez *et al.* (2005), apresentam um erro absoluto em altitude menor do que 5 metros para a América do Sul. Para fins de comparação, também foi produzido um modelo numérico de terreno (MNT) com dados de altitude do ano de 2003 obtidos a partir da base cartográfica digital na escala de 1:2.000, com curvas de nível espaçadas de 2 metros, que cobrem parcialmente a área de estudo. Foram realizadas tarefas de edição baseadas nas curvas de nível, para produção do modelo digital do terreno, no ambiente computacional do ArcGis.

3.1.2 Imagem digital de sensores remotos orbitais

Foi utilizada uma imagem do satélite *Quick Bird* de 12/09/2007 referente à área de estudo, com quatro bandas espectrais de resolução espacial de dois (2) metros e mais uma banda pancromática com resolução espacial de 0,7 metro. A referida imagem foi obtida em uma data que a cota do reservatório da UHE Corumbá IV era mínima, correspondente ao período de seca na região da área de estudo. As bandas multiespectrais sofreram um processo de fusão com a banda pancromática utilizando um algoritmo de transformação RGB - IHS do sistema SPRING, conforme metodologia descrita em Almeida *et al,* (2008).

3.1.3 Ortofotos digitais

Foram utilizadas dez ortofotos digitais oriundas de um voo aerofotogramétrico de 2003, anterior ao alagamento do reservatório da UHE Corumbá IV, com resolução espacial de 40 cm, disponibilizadas pela empresa Corumbá Concessões S.A. As referidas ortofotos cobrem cerca 45% da área de estudo.

3.1.4 Dados de campo

Durante os trabalhos de campo realizados na área de estudo, foram coletadas amostras de solo para ensaios geotécnicos em laboratório. Em campo foram feitos ensaios com o penetrômetro dinâmico Panda e determinadas coordenadas geográficas por rastreio GPS (*Global Positioning System*) para utilização como pontos de controle para registro de imagens. Realizaram-se o reconhecimento de feições de interesse que caracterizam as zonas homólogas do relevo e o uso e a cobertura do solo.

3.1.5 Mapas temáticos

Na pesquisa, utilizaram-se mapas temáticos de geomorfologia, pedologia e vegetação, em formato digital *Shapefile,* na escala de 1/400.000, obtidos junto ao Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas do Estado de Goiás (SIEG, 2007).

3.1.6 Dados de pluviometria

Com o objetivo de se obter a erosividade da chuva, foram utilizados dados de pluviosidade média mensal de 19 estações pluviométricas constantes do sistema "Hidroweb" da Agência Nacional de Águas (ANA). As estações estão localizadas nas proximidades da área de estudo, e os dados abrangem um período de cerca de 30 anos de observação diária. 3.1.7 Sistemas de informações geográficas (SIG)

Na pesquisa em pauta, as tarefas de geoprocessamento e de processamento de imagens digitais foram realizadas nos sistemas de informações geográficas (SIG), o SPRING e o ArcGis, desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela ERDAS, respectivamente. Utilizaram-se também os respectivos programas dos equipamentos usados nos ensaios laboratoriais e o penetrômetro Panda.

3.2 Metodologia

3.2.1 Produção dos modelos numéricos de terreno (MNT)

Utilizaram-se os algoritmos de produção de modelo numérico do terreno para se aproveitarem os dados da base cartográfica, onde esses existiam, e as informações de elevação do

terreno contidas nos dados do SRTM. O MNT forneceu subprodutos, em formato de grade ou imagem, utilizados no apoio à definição das zonas homólogas do relevo da área de estudo. Os subprodutos mais utilizados foram a declividade, a hipsometria, a curvatura e a integração do MNT à imagem *Quick-Bird* georeferenciada, o que produziu uma visão tridimensional do relevo da área de estudo.

3.2.2 Determinação das zonas homólogas e reclassificação dos mapas temáticos

Em um processo de produção de uma carta geotécnica de capacidade de infiltração da água no solo, a determinação das zonas homólogas é essencial para a reclassificação de mapas temáticos que representam a geomorfologia e a pedologia da área de estudo, essenciais tanto na determinação da perda de solo por erosão laminar quanto da infiltrabilidade. Normalmente, essas cartas temáticas são confeccionadas no País em pequenas escalas, menores do que 1:250.000 e, por isso, não representam certas peculiaridades essenciais no diagnóstico da erosão e da infiltração da água nos solos em uma área de interesse quando estudada em maior detalhe. Assim, a determinação das zonas homólogas, baseada em um critério de reinterpretação desses temas em função das unidades de relevo, permite a sua melhor adequação em função da realidade da paisagem local.

As zonas homólogas do relevo da área de estudo foram digitalizadas em formato *shapefile* no ArcGis, a partir de uma análise sintética baseada em critérios de fotointerpretação contidos em Brink *et al.* (1966), conforme apresentado na Figura 2.

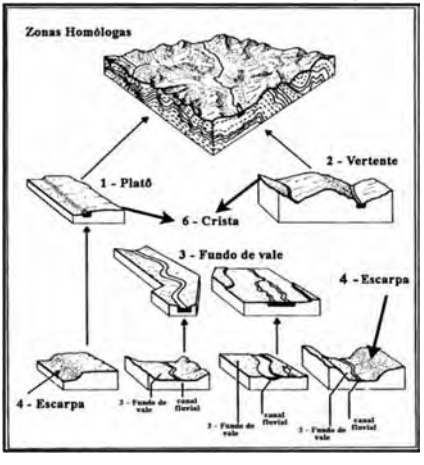


Figura 2. Aplicação da técnica de avaliação de terreno por zonas homólogas (traduzido a partir de BRINK *et al.*,1966).

No processo de digitalização das zonas homólogas, utilizram-se os subprodutos do MNT obtidos no ArcGis, a saber: a) integração da imagem *Quick-Bird* georeferenciada e o MNT, por meio do aplicativo *ArcScene* do ArcGis; b) declividade do terreno, um dos principais fatores que influenciam diretamente o escoamento superficial e, portanto, também a infiltração, principalmente em movimentos de descida de vertentes e c) curvatura do terreno obtida pela alocação de uma superfície, calculada *pixel-a-pixel*, por meio de um ajuste polinomial de 4ª

ordem. Assim, o relevo é dividido em classes, em função das suas propriedades e relações dos atributos e de acordo com as características dos componentes do meio físico analisado, a saber: a) fundo de vale; b) vertentes; c) escarpa; d) platô e e) crista de relevo. Para cada feição de zona homóloga digitalizada, exceto a "crista de relevo", foram calculadas suas respectivas áreas. Essa divisão se justifica pela grande diferença com que impactam a erodibilidade e a infiltração. Para pesquisas posteriores seria ainda interessante levar em conta o período decorrido entre o desmatamento e/ou a exposição do solo e o momento da avaliação, pois é sabido que a estrutura do solo perturbada passa nos ciclos de molhagem e secagem por um processo de densificação, afetando diretamente a infiltrabilidade e a erodibilidade. Mas isso pode ocorrer em sentido que pode tender ao inverso, pois quanto mais compacto o solo menor a infiltrabilidade e, portanto, maior o escoamento superficial; por outro lado, o solo também se torna menos erodente. Percebe-se, então, que nessa equação a densificação do solo só o tornará mais erodente se a energia potencial interna resistente superar a energia potencial erodente externa.

3.2.3 Ensaios geotécnicos em amostras de solo

Com o objetivo de se verificarem as propriedades geotécnicas dos solos indicados como suscetíveis à erosão laminar e sua influência na capacidade de infiltração, foram coletadas amostras de solo durante os trabalhos de campo realizados na área de estudo, entre as bacias hidrográficas do ribeirão Sarandi e do córrego do Pirapitinga, no entorno do reservatório da usina hidrelétrica (UHE) Corumbá IV. A seleção dos locais de coleta de amostras de solo foi feita por amostragem a partir das zonas homólogas do relevo que permitissem o acesso físico e que fossem representativas dos locais indicados.

As amostras de solo para realização dos ensaios de laboratório foram coletadas em trincheiras abertas no terreno, com profundidade que variavam entre 40 cm até um metro, em alguns casos, por meio de trado. A Tabela 1 apresenta as coordenadas geográficas e respectivas zonas homólogas dos locais selecionados para coleta de amostras de solo que foram submetidas aos ensaios geotécnicos.

Tabela 1. Pontos de coletas de amostras de solo na área de estudo.

Pontos de coleta de amostras de solo	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Zona Homóloga
Ponto 1: Área de empréstimo	16º 21' 08".7	48º 18' 48".3	Escarpa
Ponto 2: Ilha do Pirapitinga I	16º 19' 09".7	48º 16' 06".3	Fundo do Vale
Ponto 3: Ilha do Pirapitinga II	16º 19' 34".1	48º 17' 39".6	Vertente
Ponto 4: Enseada Canal do Sarandi	16º 19' 22".3	48º 14' 57".8	Vertente
Ponto 5: Ribeirão do Sarandi	16º 21' 28".5	48º 15' 09".8	Fundo do Vale
Ponto 6: Canal do Sarandi	16º 20' 43".7	48º 14' 37".1	Vertente
Ponto 7: Margem do Sarandi I	16º 20' 13".0	48º 13' 36".1	Escarpa
Ponto 8: Margem do Sarandi II	16º 21' 19".2	48º 14' 45".6	Escarpa
Ponto 9: Ilha do Canal do Sarandi	16º 20' 20".8	48º 14' 19".6	Fundo do Vale
Ponto 10: Ilha I	16º 20' 38".1	48º 14' 20".1	Fundo do Vale
Ponto 11: Córrego Pirapitinga I	16º 19' 39".2	48º 18' 24".7	Fundo do Vale
Ponto 12: Córrego Pirapitinga II	16º 21' 43".1	48º 18' 40".9	Vertente

(continuação)

Pontos de coleta de amostras de solo	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Zona Homóloga
Ponto 13: Córrego Pirapitinga III	16º 20' 04".2	48º 16' 59".0	Escarpa
Ponto 14: Estrada do Pirapitinga	16º 22' 27".6	48º 18' 27".9	Fundo do Vale
Ponto 15: Estrada do Sarandi	16º 21' 55".8	48º 14' 49".8	Escarpa
Ponto 16: Encruzilhada de Estradas	16º 22' 51".9	48º 14' 21".5	Platô
Ponto 17: Quina da Fazenda	16º 23' 20".3	48º 15' 21".4	Platô

Com base nas normas da ABNT e outras na ausência dessas, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais nas amostras de solo: a) verificação da expansão, penetração, resistência e plasticidade (ABNT NBR 7180:1984); b) determinação da massa específica aparente e real e determinação de índices de vazios (ABNT NBR 7182:1986); c) determinação de umidade natural e higroscópica (ABNT NBR 7185:1986); d) determinação dos limites de Atterberg: limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade (ABNT NBR 6459:1984 e ABNT NBR 7180:1984); e) determinação do peso específico dos grãos menores que 2 mm (ABNT NBR 7181:1984); f) análise granulométrica por peneiramento (ABNT NBR 7181:1984); g) análise granulométrica por sedimentação: com e sem o uso de defloculante (ABNT NBR 7181:1984); h) análise granulométrica a laser: com e sem ultrassom; i) análise química para determinação do pH: em água destilada e em KCl e determinação do ΔpH; e j) análise mineralógica por difratometria de raios-X para detecção da presença de quartzo, gibsita, ilita, muscovita e caolinita.

Os ensaios laboratoriais permitiram a classificação unificada dos solos de acordo com a Norma ASTM 2487D-85 pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), importante na determinação da sua erodibilidade, com base nas características de tamanho de partícula, de limite de liquidez e do índice de plasticidade. A classificação TRB (*Transportation Research Board)* foi também realizada, pois é aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários, em que os solos são divididos em dois grandes grupos: os materiais granulares e os materiais silto-argilosos. A classificação de solos tropicais MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) identifica o comportamento laterítico ou não do solo. Usaram-se, neste estudo, os ensaios mini-MCV expeditos, complementados por ensaios de perda de massa por imersão do solo em estado natural. As metodologias, os conceitos teóricos e as aplicações dessas classificações de solos constam de uma gama considerável de referências bibliográficas como as que se encontram em Silva *et al.* (2010).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), exceto a análise mineralógica por difratometria de raios X, que foi realizada no Laboratório do Instituto de Geociências da UnB. Em campo, além das observações qualitativas, foi realizado o ensaio com o penetrômetro dinâmico Panda, que permitiu avaliar o processo de densificação do solo a partir da superfície, assim como a alteração de comportamento mecânico dos perfis de solos naturais.

3.2.4 Produção do mapa temático de uso e cobertura do solo

O mapa temático de uso de solo é um dos basilares para o diagnóstico da erosão laminar e dos processos de infiltração da água no solo. A metodologia aplicada utiliza os algoritmos de processamento de imagens digitais existentes no Spring, cujos princípios de funcionamen-

to estão explicitados em Schowengerdt (1983) e em Almeida *et al.* (2008). Esses algoritmos foram aplicados sobre a imagem *Quick-Bird* para produção do mapa temático de uso e cobertura do solo e constou das seguintes etapas:

- Registro das imagens – executado utilizando-se as coordenadas geográficas dos pontos de controle medidas durante trabalho de campo;
- Análise de componentes principais – a imagem georeferenciada foi submetida ao algoritmo de análise de componentes principais, e a banda espectral resultante, denominada CP-1, foi utilizada por possuir mais de 85% das informações espectrais das bandas originais;
- Filtragem espectral "passa-baixa" – com vistas à redução de ruídos no processo de segmentação da imagem, foi aplicado o filtro espacial linear "passa-baixa" sobre a banda CP-1, que acarretou a sua suavização e a atenuação das altas frequências e minimizou os ruídos existentes;
- Segmentação da imagem – a banda CP-1 foi submetida ao processo de segmentação com a opção de crescimento de regiões, em que os parâmetros de área de pixel e similaridade utilizados foram iguais a dez (10), e conteve as regiões com os polígonos de uso e cobertura do solo, obtidos durante a sua classificação temática;
- Classificação temática da imagem – a partir da imagem segmentada e utilizando-se a banda CP-1 filtrada, foi realizada a classificação temática por região, com o classificador "Isoseg", cujos temas de uso e cobertura do solo foram agrupados nas seguintes classes temáticas, verificadas durante os trabalhos de campo: reservatório, açudes, cerradão, mata de galeria, campo sujo, solos expostos, solos preparados para cultura agrícola, cultura agrícola tipo I (soja), cultura agrícola tipo II (cana-de-açúcar), cultura agrícola tipo III (milho), área de queimada, área de pastagens e estradas;
- Vetorização da imagem classificada – a imagem classificada na temática resultante foi vetorizada e, em seguida, cada classe temática foi associada ao seu respectivo polígono, produzindo um mapa temático de uso e cobertura do solo, para o ano de 2007, na escala de 1/10.000.

O mapa temático de uso e cobertura do solo, juntamente com as observações coletadas no trabalho de campo, fornece os principais indicativos para determinação de práticas conservacionistas (fator P) e de manejo de solo (fator C), principais fatores utilizados no modelo da EUPS e também aplicados na avaliação da capacidade da infiltração da água no solo, apresentados a seguir.

3.2.5 Produção da carta geotécnica de perda de solos baseada na Equação Universal de Perdas do Solo (EUPS) e sua adaptação para a avaliação preliminar da capacidade de infiltração da água no solo

A pesquisa em pauta adaptou o modelo da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978), útil para identificar áreas potencialmente sujeitas à erosão laminar, para identificar a capacidade de infiltração de água no solo. A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) tem, em sua versão original, a seguinte forma:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

em que: A é a perda média anual de solo (t.ha^{-1}/ano); R é o fator de erosividade da chuva (MJ. mm) (ha.h)$^{-1}$; K é o fator de erodibilidade do solo, em (t.ha.h/ha.MJ.mm); LS é o fator topográfico (adimensional), sendo L o comprimento de rampa e S a declividade; C é o fator de uso/manejo do solo (adimensional); e P é o fator de práticas conservacionistas (adimensional).

É possível admitir preliminarmente que a capacidade de infiltração da água no solo apresente uma relação inversa ao potencial de perda de solo por erosão laminar. Seus fatores, como os valores elevados de erosividade da chuva, pressupõem altos valores de escoamento superficial e, consequentemente, baixa infiltração. Uma alta erodibilidade de solo pressupõe uma elevada quantidade de areia e silte nos solos, que a princípio favorecem a infiltração da água no solo; um fator de relevo elevado pressupõe alto escoamento superficial e baixa capacidade de infiltração de água no solo. Baixos valores dos fatores C e P possuem relação direta com a baixa capacidade de infiltração de água no solo, pois se caracteriza por uso intenso do solo por práticas de agricultura mecanizada e de pecuária acompanhada por ações de desmatamento para remoção da cobertura vegetal de cerrado existente na área de estudo. Cabe destacar que, no caso dos solos tropicais profundamente intemperizados, como é o caso dos latossolos, a classificação textural quanto à erodibilidade deve levar em conta o solo no estado natural, ou seja, não deve se fundamentar em ensaios laboratoriais que façam uso de agentes desagregadores, sejam eles químicos ou mecânicos. Isso é importante, pois vários desses solos minerais e desagregados são predominantemente argilosos, mas quando no estado natural formam agregados dos tamanhos silte e areia, comportando-se como tais frente à infiltração.

Assim, ao se determinarem os fatores relacionados da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), simulados em ambiente computacional, por álgebra de mapas, em uma relação inversa da Equação 1, pode-se obter, então, uma carta geotécnica preliminar que represente a capacidade de infiltração da água no solo, cujos fatores organizados em mapas temáticos são descritos a seguir.

a) Produção do mapa de erosividade e infiltrabilidade da chuva (fator R):

Para a etapa de caracterização fisiográfica da área de estudo, quanto à precipitação, foram considerados os dados das estações pluviométricas para um período, em média, de 35 anos. No método de ponderação regional, cada uma das falhas nos dados de um ou mais postos foram preenchidas utilizando-se a Equação 2:

$$y_c = \frac{1}{n}\left[\frac{x_1}{x_{m1}} + \frac{x_2}{x_{m2}} + \frac{x_1}{x_{m3}} + \ldots + \frac{x_n}{x_{mn}}\right] \cdot y_m \qquad (2)$$

em que: y_c é o valor de precipitação a ser estimada para o posto; x_1 a x_n são os valores de precipitações mensais (ou anuais) dos n postos circunvizinhos; y_m é o valor de precipitação média mensal (ou anual) do posto com falha de dados; x_{m1} a x_{mn} são os valores de precipitações médias mensais dos *n* postos circunvizinhos. A determinação do valor médio do índice de erosividade por meio da relação entre a média mensal e a média anual de precipitação, conforme expresso pela Equação 2, foi proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). Para determinação do fator R da EUPS, soma-se o resultado dos valores mensais do índice de erosividade em cada estação, conforme mostrado na Equação 3, a seguir.

$$EI_{30} = 67.355\left(\frac{r^2}{P}\right)^{0.85} \qquad (3)$$

em que: EI_{30} é a média mensal do índice de erosividade, em MJ.mm/(ha.h); r é a média do total mensal de precipitação, em mm; P é a média do total anual de precipitação, em mm.

Para a aplicação desse fator na avaliação da capacidade de infiltração, é preciso entender que, da forma como foi definido, ele é tanto maior quanto maior for a concentração das chuvas. Assim, para o caso da capacidade de infiltração da água no solo, faz-se necessário ajustá-lo de modo que seja tanto maior quanto melhor for a distribuição das chuvas durante o ano, pois chuvas de pequena intensidade bem distribuídas ao longo do ano implicam uma maior capacidade de infiltração. No entanto, para o caso específico aqui analisado, a variação da erosividade da chuva não foi grande; por não haver ainda uma formulação específica para a capacidade de infiltração de água no solo, admitiu-se que essa capacidade pode ser considerada constante em toda a área.

O fator R (erosividade da chuva) da EUPS foi obtido utilizando o aplicativo de geoestatística espacial, o interpolador "Inverso da Distância Ponderada" do ArcGis, a partir dos dados calculados de erosividade da chuva e das coordenadas geográficas da estações pluviométricas, em que se produziu o fator R em forma de imagem. A Tabela 2 apresenta os valores de erosividade da chuva obtidos com base nos dados das estações pluviométricas usadas no estudo.

Tabela 2. Valores de erosividade da chuva (fator R).

Nome da Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Erosividade (MJ.mm/ha.h)
Contagem	15º 39' 11"	47º 52' 44"	8338,97
Brazlândia	15º 40' 50"	48º 12' 08"	8565,14
Gama	15º 59' 13"	48º 03' 01"	8397,58
Taguatinga	15º 47' 34"	48º 07' 03"	8222,48
Descoberto	15º 46' 49"	48º 13' 49"	7706,07
Jatobazinho	15º 42' 43"	48º 05' 33"	8120,85
Riacho Fundo	15º 53' 54"	48º 02' 37"	8127,22
UnB	15º 44' 20"	48º 06' 25"	7628,33
Fazenda Sta Eliza	15º 35' 48"	48º 02' 35"	8387,18
Luziânia	16º 15' 0"	47º 57' 44"	7478,69
São Bartolomeu	16º 32' 16"	47º 48' 20"	7414,39
Cristalina	16º 45' 23"	47º 36' 22"	8192,30
Mingone	16º 09' 21"	47º 56' 12"	8257,62
Fazenda Buriti	16º 54'	47º 55'	7957,61
INPE	16º 21' 47"	48º 05' 23"	9235,68
Ponte Anápolis	16º 05' 0"	48º 30' 00"	8057,84
Vianópolis	16º 44' 47"	48º 31' 29"	9406,60

b) Produção do mapa de erodibilidade e infiltrabilidade do solo (fator K):

Os valores do fator K (erodibilidade e infiltrabilidade do solo) da EUPS para a área de estudo foram obtidos com base no mapa pedológico e em dados de bibliografias correlatas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990). A Tabela 3 apresenta os valores de erodibilidade e infiltrabilidade do solo obtidos na área de estudo, a partir dos quais, por meio da função de conversão de feições em polígonos do ArcGis, produziu-se o fator K em forma de imagem. Nessa tabela, a capacidade de infiltração foi obtida invertendo-se os valores de erodibilidade.

Tabela 3. Valores de erodibilidade (fator K) e de capacidade de infiltração da água para os solos da área de estudo.

Tipo de solo	Erodibilidade	Capacidade de Infiltração
LEd1: Associação de LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO DISTRÓFICO ou ÁLICO, de textura muito argilosa, com LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO, de textura muito argilosa ou argilosa, ambos presentes em relevo plano e suave ondulado.	0,013	77
LEd5: Associação de LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO com LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, ambos DISTRÓFICOS de textura argilosa, presentes em relevo suave ondulado e plano. Pode também estar associado ao CAMBISSOLO DISTRÓFICO ou ÁLICO, de textura argilosa cascalhenta ou média cascalhenta, presente em relevo ondulado.	0,014	71
LVd2: Associação de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, de textura muito argilosa, presente em relevo plano e suave ondulado, com LATOSSOLO PETROPLÍNTICO, de textura muito argilosa cascalhenta de fase pedregosa ou endopedregosa, presente em relevo suave ondulado e plano, ambos DISTRÓFICOS.	0,024	42
LPd: Associação de LATOSSOLO PETROPLÍNTICO, de textura argilosa cascalhenta ou argilosa cascalhenta ou muito argilosa cascalhenta, em fase pedregosa ou endopedregosa, com LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO textura muito argilosa ou argilosa, ambos DISTRÓFICOS, presente em relevo suave ondulado e plano.	0,035	29
Cd3: Associação de CAMBISSOLO Tb, de textura média cascalhenta, com SOLOS LITÓLICOS de textura média muito cascalhenta, ambos DISTRÓFICOS, presente em relevo ondulado e forte ondulado.	0,050	20
Cd1: Associação de CAMBISSOLO DISTROFICO ou ALICO Tb, de textura média cascalhenta ou argilosa cascalhenta, presente em relevo ondulado e forte ondulado, com SOLOS LITÓLICOS DISTRÓFICOS, de textura média cascalhenta, presentes em relevo forte ondulado, ambos em fase pedregulhosa.	0,050	20
Rd1: Associação de SOLOS LITÓLICOS, de textura média cascalhenta, presente em relevo forte ondulado, com CAMBISSOLO Tb de textura argilosa cascalhenta, presente relevo ondulado e forte ondulado, ambos DISTRÓFICOS.	0,055	18

c) Produção do mapa do fator de relevo (LS):

Com base no MNT produzido com dados SRTM para a área de estudo, no módulo "3D Spatial Analyst" do ArcGis foi produzido o modelo da declividade do terreno (D), em radianos. A declividade (D) e o comprimento de rampa (L) exercem forte influência na capacidade de infiltração dos solos, pois afetam diretamente a velocidade e o volume do escoamento superficial, interferindo, portanto, diretamente na infiltração. A síntese desses dois fatores é denominada de fator de relevo (LS). Para determinação do fator LS da EUPS, utilizou-se a metodologia proposta por Moore e Burch (1996), cuja expressão para o cálculo do fator é

derivada da estimativa de LS baseada no acúmulo de fluxo (ou área de contribuição) e declividade, fornecida pela Equação 4.

$$LS = \left(\frac{FlowAccumulation\ x\ CellSize}{22{,}13}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{sen\ (Slope)}{0{,}0896}\right)^{1,3} \quad (4)$$

em que: *"FlowAccumulation"* é o acúmulo de fluxo ou área de contribuição, obtida com o módulo *"Hidrology"* do ArcGis; *"CellSize"* é o tamanho da célula do modelo digital de elevação e corresponde a dois metros de resolução espacial da imagem de acúmulo de fluxo; *"Slope"* é a declividade em radianos, calculada para cada pixel.

No caso da capacidade de infiltração para o fator LS, pode-se supor que quanto maior a declividade menor a infiltração, já que altas declividades favorecem o escoamento superficial (diminui a infiltração), e quanto maior o comprimento de rampa maior o acúmulo de água na superfície do solo, levando a um rápido aumento da saturação do solo, o que também pode implicar uma diminuição da capacidade de infiltração da água no solo. Assim, para efeito da avaliação qualitativa da capacidade de infiltração da água no solo, os valores de LS foram considerados de tal forma que variassem de 0 a 100%, em uma relação inversa a da sua influência na determinação da perda de solo por erosão laminar.

d) Produção dos mapas de fator de manejo do solo (fator C) e de práticas conservacionistas (fator P):

A Tabela 4 apresenta os valores do fator C e P, agrupados como fator CP, valores atribuídos para as classes de uso e cobertura de solo. Os valores de CP para o cálculo da perda de solo por erosão laminar foram definidos com base nos valores indicados na literatura e nas observações de campo. Já os valores de CP para avaliação da capacidade de infiltração da água no solo foram definidos de forma relativa (de 0 a 100%), calculados como uma função inversa a da erosão.

Tabela 4. Valores do Fator CP para o calculo da perda de solo por erosão e para a capacidade de infiltração.

Uso e Cobertura do Solo	Fator CP	
	Erosão	Infiltração
Açude	X	X
Reservatório	X	X
Cerradão	0,010	100
Mata de Galeria	0,013	80
Culturas agrícolas	0,014	70
Campo sujo	0,015	65
Pastagem	0,017	60
Solos preparados para cultura	0,020	50
Estradas	0,023	44
Queimadas	0,033	30
Solos expostos	0,040	25

Em seguida, utilizando-se a função de conversão de feições em polígonos, a partir dos atributos do fator CP da EUPS e dos gerados para a capacidade de infiltração, foram produzidas suas respectivas imagens.

A produção da carta geotécnica de capacidade de infiltração da água no solo para a área de estudo foi realizada a partir da média dos fatores aqui descritos, enquanto a perda por erosão laminar baseou-se na EUPS, A = R.K.L.S.C.P (Equação 1), por meio da função *"raster calculator"* do ArcGis, em que foi aplicada a álgebra de mapas, ou seja, o produto dos valores contidos nas imagens de erosividade da chuva (R), da erodibilidade do solo (K), do fator de relevo (LS) e dos fatores de manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas (P), em formato de imagem.

4. Resultados obtidos e conclusões

4.1 Modelos numéricos do terreno (MNT) da área de estudo

Foram produzidos dois modelos numéricos de terreno (MNT): o obtido com a base cartográfica digital em escala 1:2000, que abrange cerca de 20% da área de estudo, e o obtido com o SRTM, que abrange completamente a área de estudo.

A Figura 3 apresenta a hipsometria do MNT da base cartográfica digital. Nela, as áreas nas cores azul, creme e verde são as que foram ocupadas pelo reservatório da UHE Corumbá IV após o seu alagamento, nas altitudes entre 798 e 846 metros.

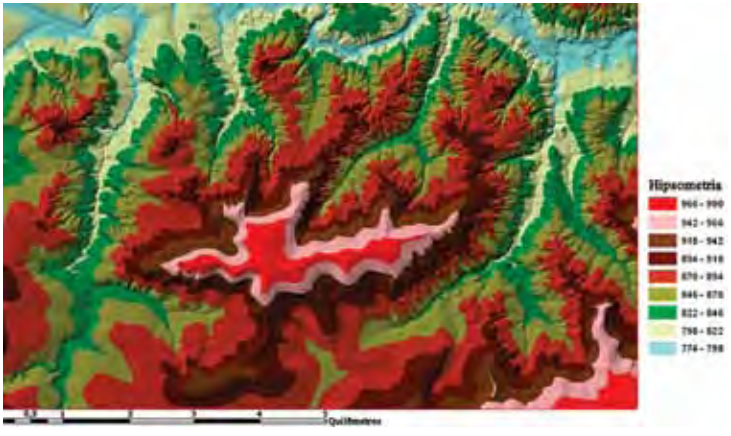


Figura 3. Hipsometria do MNT obtida com a base cartográfica digital.

4.2 Mapa de zonas homólogas

Foram digitalizadas as zonas homólogas para a área de estudo, com base em técnicas de fotointerpretação a partir da imagem de curvatura, da hipsometria, da declividade do MNT e da integração em três dimensões entre o MNT e a imagem *Quick-Bird*. A Tabela 5 apresenta as áreas das classes de zonas homólogas na área de estudo, com intensa variação em seu relevo, cujas declividades servem para escoamento natural dos sedimentos desprendidos e transportados por ação das chuvas, das zonas homólogas de maior altitude, as zonas homólogas "platôs" (entre 1100 a 990 metros), para as de menores altitudes, as zonas homólogas "fundo do vale", com influência na capacidade de infiltração de seus solos.

Tabela 5. Áreas das zonas homólogas determinadas para a área de estudo.

Zona Homóloga	Área Total (km²)
Fundo de Vale	43,76
Vertente	43,90
Escarpa	28,18
Escarpa Arrasada	10,38
Platô	55,86

A zona homóloga denominada "platô" foi a que apresentou a maior área, indicando um relevo relativamente plano nas altas altitudes. Essas áreas, por serem planas, favorecem a infiltração, sendo, no entanto, necessário que se avalie que os insumos agrícolas carreados pelo fluxo não são suscetíveis, por um lado, de contaminarem as águas subterrâneas, e por outro, instabilizarem as vertentes. Esses aspectos não foram avaliados neste estudo, mas merecem mais atenção.

O número elevado de escapas e vertentes apontam para uma área de relevo intensamente acidentada, cuja remoção da cobertura vegetal reduz a infiltração do solo, devido aos solos transportados em processos de erosão laminares. A Figura 4 apresenta os mapas obtidos para as zonas homólogas da área de estudo e os mapas de geomorfologia e pedologia da área de estudo que foram reclassificados a partir do mapa de zonas homólogas.

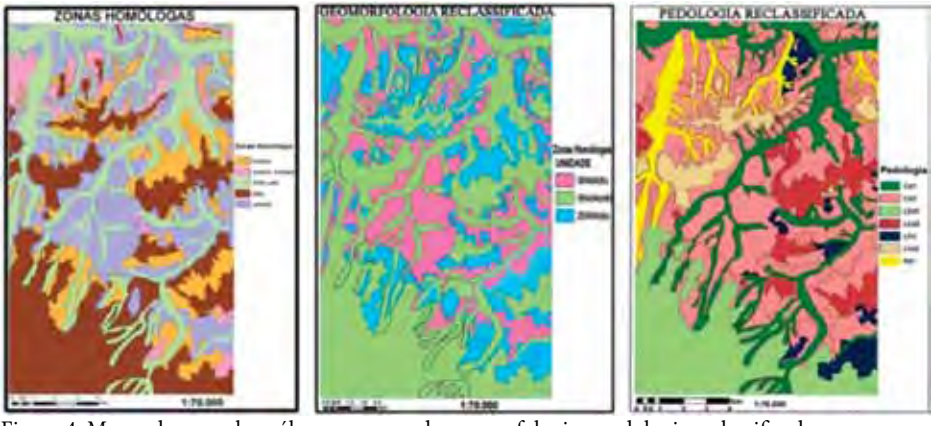


Figura 4. Mapas de zonas homólogas e mapas de geomorfologia e pedologia reclassificados.

Por sua vez, a Tabela 6 apresenta as áreas das classes e respectivas percentagens em relação à área total de geomorfologia e pedologia reclassificadas, considerando-se as zonas homólogas. As classes da geomorfologia reclassificada na área de estudo foram: a) SRAII (mfr) – Superfície Regional de Aplainamento IIA com cotas entre 900 e 1100 m, com dissecação muito fraca (mfr), desenvolvida sobre rochas pré-cambrianas, ocupa a maior área; b) SRAIIA(fo) – Superfície Regional de Aplainamento IIA com cotas entre 900 e 1100 m, com dissecação forte (fo), desenvolvida sobre rochas pré-cambrianas; e c) ZER/IIA(fo) – Zona de Erosão Recuante com dissecação forte (fo). As classes da pedologia reclassificada correspondem aos solos presentes na área de estudo citados na Tabela 3. A classe denominada Cd3 é a que apresenta a maior área total, seguida pelas Cd1 e LEd1, que são solos com alta propensão à erosão laminar e com reduzida capacidade de infiltração.

Tabela 6. Classes da geomorfologia e pedologia reclassificadas para a área de estudo.

Temas da geomorfologia, pedologia e vegetação reclassificados	Área (km²)/ percentagem
Geomorfologia: SRIIA(mfr)	110,82/19,18%
Geomorfologia: SRIIA(fo)	67,09/11,61%
Geomorfologia: ZER/IIA(fo)	44,09/7,63%
Pedologia: Cd1	31,61/5,43%
Pedologia: Cd3	74,94/12,97%
Pedologia: LEd1	31,65/5,45%
Pedologia: LEd5	11,95/2,07%
Pedologia: LVd2	9,24/1,60%
Pedologia: LPd	6,57/1,13%
Pedologia: Rd1	11,96/2,07%
Área Total:	577,41/100%

A área agricultada interfere diretamente nos processos erosivo e de infiltração, mas em momentos quase sempre distintos. O solo dessa área inicialmente, ao ser gradeado e adubado, fica propenso não só à infiltração, mas também à erosão. Recebendo a área nesse momento um preparo adequado em que se observa a disposição de suas curvas de níveis e, quando possível, o estabelecimento de platôs e leiras de proteção, a erosão pode ser minimizada e a infiltração favorecida. Em um segundo momento, os ciclos de molhagem e secagem vão promover a contração e impermeabilização do solo, o que, por um lado, reduz a erodibilidade, não necessariamente a erosão; por outro lado, ocorre o processo de impermeabilização, aumentando, assim, o fluxo superficial. Esses são mecanismos que necessitam ser melhor analisados, o que não será feito aqui.

4.3 Resultados obtidos para os solos em laboratório e no campo

A título de exemplo, apresenta-se a análise feita no que tange à variação multitemporal do uso e da cobertura do solo, comparando os resultados obtidos com os ensaios no laboratório e de campo e as informações obtidas durante os trabalhos de campo. Para este exemplo, escolheu-se o local denominado "Ponto 5 – Ribeirão do Sarandi", situado em uma zona homóloga do tipo fundo de vale. A Figura 5 apresenta a localização do "Ponto 5 – Ribeirão Sarandi", em sua parte superior esquerda sobre a ortofoto do ano de 2003, em uma escala visual aproximada de 1:18000, e na parte superior direita localizado na imagem *Quick Bird* de 12 de setembro de 2007.

Figura 5. Ponto 5: a e b) Variação do uso e cobertura do solo entre 2003 e 2007.

Observa-se na Figura 5, pela comparação entre a ortofoto de 2003 e a imagem *Quick-Bird de* 2007, que as mudanças ocorridas no que tange ao uso e à cobertura do solo foram por demais significativas, após o alagamento do reservatório da UHE Corumbá IV, onde ocorreu um desmatamento acentuado, causado pela abertura de diversas estradas que não obedecem a um sentido paralelo ou em zigue-zague em relação às curvas de nível (pelo contrário, com traçados diretos em direção ao reservatório) e pelas construções de casas dentro da área de proteção permanente (APP) do reservatório. Esses processos de ocupação do solo, acompanhados por desmatamentos consideráveis, contribuem para agravar o assoreamento do reservatório, pois servem como canais de fluxos de sedimentos transportados pelas chuvas.

A Figura 6 apresenta o traçado aproximado da área de proteção permanente (APP) sobre a imagem *Quick-Bird* de 12 de setembro de 2007, feito a partir da cota do reservatório de 837,3 metros presente na data em que a imagem foi obtida, na qual se pode verificar a invasão dessas estradas e as construções na área de APP do reservatório.

A Figura 7 apresenta o local onde foi coletada a amostra de solo (Figura 7b), para realização dos ensaios geotécnicos, e feito o ensaio de campo com o penetrômetro Panda.

Outro aspecto que potencializa o assoreamento do reservatório nas cercanias do "Ponto 5" está relacionado com a ponte construída no fundo do ribeirão Sarandi (Figura 7a). Conforme verificado no local, a base de seus pilares contribui para o estreitamento do canal fluvial, consequentemente, produz um bloqueio parcial ao fluxo fluvial e acarreta uma concentração de sedimentos nas proximidades de suas margens. Observa-se, na Figura 7b, o afastamento entre as margens deste trecho do ribeirão Sarandi, que pode diminuir, paulatinamente, devido aos processos de assoreamento ora em curso.

Os ensaios realizados nas amostras de solo coletadas na área de estudo (Tabela 1) tiveram o propósito de averiguar as propriedades geotécnicas dos solos da área de estudo que

Figura 6. Traçado aproximado da APP a partir da cota do reservatório de 837,3 metros.

Figura 7. "Ponto 5 – Ribeirão do Sarandi": a) ponte próxima ao "Ponto 5"; b) local de coleta da amostra de solo.

estariam relacionadas à capacidade de infiltração e a vulnerabilidade à erosão laminar. Os resultados obtidos com os ensaios geotécnicos de laboratório e de campo estão detalhados em Almeida *et al.* (2008). Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades físicas dos solos e na Tabela 8 as propriedades químico-mineralógicas e classificação dos solos.

Tabela 7. Propriedades físicas dos solos.

Ponto	G_1	S_1	M_1	C_1	G_S	W_P	W_L	I_P	E	C_L	P	R_E	ρ_d	ρ	e	M_o	M_h
1	11	18	20	51	2,59	35	47	12	N	1,3	0,5	MA	1,5	1,9	0,7	22	2,7
2	39	28	11	22	2,74	28	38	10	N	1,4	0,3	MA	-	-	-	18	1,6
3	51	24	14	11	2,69	32	41	9	N	1,2	1	MA	-	-	-	17	1,3
4	20	34	18	28	2,84	32	43	11	N	1,4	1	MA	-	-	-	16	4,2
5	11	61	16	12	2,93	21	26	5	S	0,6	2,1	A	-	-	-	16	0,7
6	34	36	19	11	2,70	30	37	7	N	1,0	0,2	MA	1,7	2	0,7	20	1,5
7	42	28	11	19	2,76	30	36	6	N	1,5	0,1	MA	1,7	2	0,7	19	1,4
8	35	37	12	16	2,71	29	39	10	N	1,2	1	A	1,7	2	0,6	20	1,1
9	47	28	10	15	2,74	28	41	13	N	1,1	0,4	A	-	-	-	16	1,0
10	39	26	14	21	2,56	29	39	10	N	1,1	0,2	A	1,8	2	0,4	13	1,3
11	45	29	16	10	2,59	26	33	7	S	0,5	2	A	0,9	1	1,8	25	0,8
12	7	18	25	50	2,78	33	48	15	N	2,2	0,1	MA	1,2	1,4	1,4	21	2,3
13	32	30	16	22	2,70	28	34	6	N	1,1	0,1	MA	-	-	-	16	0,8
14	3	29	38	30	2,77	33	40	7	S	1,7	1	MA	2	2,2	0,4	12	1,2
15	5	32	18	45	2,84	24	34	10	N	1	1	A	-	-	-	7	0,7
16	1	25	21	53	2,66	35	44	9	N	1,4	0,5	A	-	-	-	21	1,7
17	35	35	19	11	2,84	29	33	4		1	4	A	-	-	-	11	0,9

G_1 – % de pedregulho; S_1 – % de areia; M_1 – % de silte; C_1 – % de pedregulho; G_S – peso específico dos grãos finos; W_P – limite de plasticidade; W_L – limite de liquidez; I_P – índice de plasticidade; E – expansão; C_L – contração; P – penetração; R_E – resistência ao esmagamento; ρ_d – massa específica aparente seca; ; ρ – massa específica natural; e = índice de vazios; M_o – unidade natural; M_h – unidade higroscópica.

Tabela 8. Propriedades químico-mineralógicas e classificação dos solos.

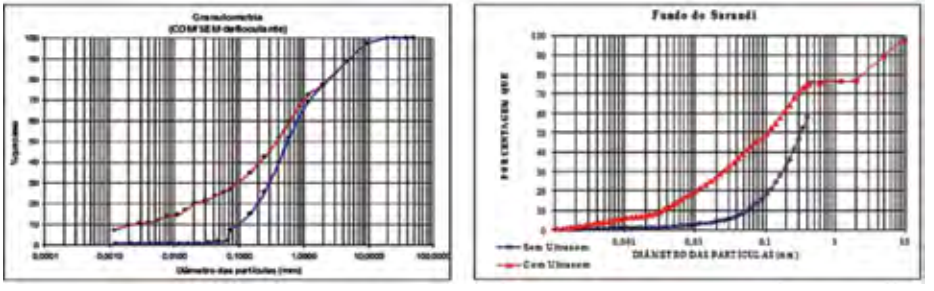
Ponto	pH/H_2O	pH /KCl	ΔpH	Q	M	G	I	K	P	MCT	SUCS	TRB	Erodibilidade
1	5,1	**5**	-0,1	S	-	S	S	S	-	LG'	ML	A-7-5	Média
2	5,9	4,6	-1,3	-	S	S	-	S	0,53	LA'	GM	A-2-4	Baixa
3	5,5	4,6	-0,9	S	-	S	S	S	1,80	LA'	GM	A-2-5	Média
4	5,8	4,7	-1,1	S	-	S	S	S	3,70	LA'	SM	A-7-5	Média
5	5,9	5,4	-0,5	S	S	S	S	S	3,78	NA'	SC-SM	A-2-4	Alta
6	5,4	4,2	-1,2	S	-	-	S	S	0,81	LA'	SM	A-2-4	Alta
7	5,5	4,4	-1,1	-	-	-	-	-	0,76	LA'	GM	A-2-4	Média
8	5,4	5,0	-0,4	-	-	-	-	-	1,71	LA'	SM	A-2-4	Média
9	5,3	4,6	-0,8	-	S	S	-	S	0,70	LA'	GM	A-2-7	Baixa
10	5,3	4,4	-0,9	-	-	-	-	-	0,34	LA'	GM	A-2-4	Baixa
11	4,1	4,4	0,3	-	-	-	-	-	0,63	LA'	GM	A-2-4	Média
12	5,6	4,8	-0,8	-	-	-	-	-	-	LG'	ML	A-7-5	Média

(continuação)

Ponto	pH/H_2O	pH /KCl	ΔpH	Q	M	G	I	K	P	MCT	SUCS	TRB	Erodibilidade
13	6,1	4,8	-1,3	-	-	-	-	-	1,10	LA'	GM	A-4	Média
14	4,9	4,2	-0,7	-	-	-	-	-	-	LG'	ML	A-4	Alta
15	4,9	4,2	0,7	-	-	-	-	-	-	LG'	ML	A-4	Média
16	7,8	7,6	-0,2	-	-	-	-	-	-	LG'	ML	A-5	Alta
17	7,6	6,8	-0,8	-	-	-	-	-	-	NA	SM	A-2-4	Média

Minerais: Q – quartzo; M – muscovita; G – gibsita; I – ilita; K – caolinita; Sistema Panda – resistência à penetração de ponta; SUCS: ML = silte com areia; GM – pedregulho siltoso com areia; SM – areia siltosa com pedregulho; SC-SM – areia argilo siltosa.

A Figura 8 apresenta, para a amostra de solo coletada no "Ponto 5", as curvas granulométricas obtidas por peneiramento e ensaios de sedimentação com e sem o uso do defloculante hexametafosfato de sódio e ensaios no granulômetro a *laser* com e sem o uso de ultrassom.



(a) (b)

Figura 8. Análise granulométrica da amostra de solo do "Ponto 5": a) ensaios com e sem o uso de defloculante; b) ensaios no granulômetro a *laser* com e sem o uso do ultrassom.

Observa-se na Figura 8 que a diferença entre as curvas com e sem o uso de defloculante (Figura 8a) atesta a presença de agregados ou pacotes de argila que podem ser erodidos pelos componentes químicos existentes nos fertilizantes e defensivos agrícolas. Por sua vez, a diferença entre as curvas com e sem o uso de ultrassom na análise de granulometria a *laser* (Figura 8b) atesta a presença de agregados ou pacotes de argila que podem ser erodidos pela ação mecânica dos implementos agrícolas usados no preparo do solo para o plantio de culturas de soja e cana-de-açúcar, práticas comuns na agricultura mecanizada presente na área de estudo. Os agregados ou pacotes de argila encontrados no local certamente contribuem para uma melhor infiltração e resistência à erosão; no entanto, podem ser destruídos pelas atividades agrícolas na área.

A partir dos resultados dos ensaios geotécnicos, foram classificados os solos quanto à erodibilidade, cujos resultados são apresentados na Tabela 8. Segundo Vale Junior *et al.* (2009), existe uma relação entre a velocidade de infiltração básica do solo (VIB) com a sua granulometria, em que os solos com menores teores de argila apresentam uma alta VIB. A combinação de uma boa infiltração de água com relevo predominantemente plano, como o que ocorre nas zonas homólogas do tipo platô, a princípio teria melhor capacidade de infiltração e menor risco de perdas de solos por erosão laminar. Porém, como observado na

Tabela 9, essas áreas apresentaram erodibilidade do solo alta e média (pontos 16 e 17), afetada principalmente pela intensa atividade de agricultura mecanizada e pelo uso intenso de defensivos e insumos agrícolas. Neste caso específico, em uma primeira fase, a da aragem e do gradeamento do solo, a infiltração é favorecida; porém, com a desagregação e a compactação gerada pelos ciclos de molhagem e secagem, essa tendência pode se inverter.

Tabela 9. Síntese das classificações geotécnicas nas amostras de solo analisadas.

Local	Zona homóloga	Classe de solo	Infiltrabilidade	Erodibilidade
Ponto 1	Escarpa	Argila siltosa	Média	Média
Ponto 2	Fundo do Vale	Pedregulho argiloso com areia	Alta	Baixa
Ponto 3	Vertente	Pedregulho siltoso com areia	Média	Média
Ponto 4	Vertente	Areia argilosa com pedregulho	Média	Média
Ponto 5	Fundo do Vale	Areia siltosa	Baixa	Alta
Ponto 6	Vertente	Areia siltosa com pedregulho	Baixa	Alta
Ponto 7	Escarpa	Pedregulho siltoso com areia	Média	Média
Ponto 8	Escarpa	Areia argilosa com pedregulho	Média	Média
Ponto 9	Fundo do Vale	Pedregulho argiloso com areia	Alta	Baixa
Ponto 10	Fundo do Vale	Pedregulho argiloso com areia	Alta	Baixa
Ponto 11	Fundo do Vale	Pedregulho siltoso com areia	Média	Média
Ponto 12	Vertente	Argila siltosa	Média	Média
Ponto 13	Escarpa	Pedregulho siltoso com areia	Média	Média
Ponto 14	Fundo do Vale	Silte arenoso	Baixa	Alta
Ponto 15	Escarpa	Argila arenosa	Média	Média
Ponto 16	Platô	Silte arenoso	Baixa	Alta
Ponto 17	Platô	Areia siltosa com pedregulho	Média	Média

Os solos nas escarpas desmatadas não possuem mais a cobertura vegetal original de cerrado e apresentam infiltrabilidade e erodibilidade do solo média. Os ensaios de campo com penetrômetro Panda apresentam baixa resistência à penetração, o que pode se associar à maior taxa de infiltração e à presença de um solo com elevada concentração de matéria orgânica. Os solos com presença de pedregulho apresentam alta (pontos 2, 9 e 10) e média infiltrabilidade do solo (pontos 7, 11 e 13). Os demais tipos de solo presentes (pontos 5, 6, 14 e 16) apresentam alta erodibilidade e baixa infiltrabilidade do solo, com alta penetratibilidade. Por sua vez, os solos com predominância de areia em sua composição, mesmo que possuam erodibilidade do solo média a alta, apresentam maior capacidade de infiltração e, por consequência, menor acúmulo de água na superfície e menor erosão laminar.

Os ensaios geotécnicos, tanto os de campo como os de laboratórios, confirmaram a existência de locais situados às margens do ribeirão Sarandi e nas enseadas das bacias do córrego Capão Rico, cujos solos são classificados como "sem coesão e com uma baixíssima resistência à penetração dinâmica". Esses locais estão situados em sopés de vertentes acentuadas e com um alto grau de ocupação antrópica. Essas características, por si só, tornam esses solos muito propícios aos processos erosivos laminares e diminuem sua capacidade de infiltração. Como esses cursos d'água possuem, graças à sua morfometria e geologia, uma energia considerável no transporte de sedimentos das regiões de maior altitude para o reservatório, existe a possibilidade de que, em alguns trechos, as suas margens opostas venham a se unir devido ao

assoreamento ora em curso. Tal fato reduziria o espelho d'água do reservatório na área de estudo e, consequentemente, a capacidade da UHE Corumbá IV em produzir energia elétrica.

Os ensaios geotécnicos também confirmaram, nos locais próximos às propriedades agrícolas com cultura mecanizada de soja e de cana-de-açúcar e às margens de estradas que se conectam ao reservatório da UHE Corumbá IV, similar às curvas apresentadas na Figura 8, a existência de erosões laminares classificadas pela pesquisa em pauta como de alta intensidade. Esses locais se situam nas maiores altitudes das bacias hidrográficas do ribeirão do Sarandi e do córrego Pirapitinga, em que as propriedades agrícolas ali existentes empregam, de forma intensa, o uso de calcário para alcalinização do solo, bem como fertilizantes químicos e defensivos agrícolas que, em seu conjunto, aumentam bastante a compactabilidade do solo e contribuem para contaminação dessas bacias e para o transporte de sedimentos lixiviados pela ação da chuva, principalmente através das estradas que conectam essas áreas agrícolas ao reservatório da UHE Corumbá IV, reduzindo a capacidade de infiltração desses solos.

4.4 Produção do mapa temático de uso e cobertura do solo

Foi produzido o mapa temático de uso e cobertura de solo com as classes temáticas definidas durante o processo de classificação da imagem "*Quick-Bird*". A Tabela 10 apresenta a quantidade e as áreas das feições relacionadas ao uso e à cobertura do solo, associados às zonas homólogas. A associação feita na Tabela 10 das zonas homólogas e a cobertura e uso do solo subsidia a compreensão dos fluxos de sedimentos transportados nas estações chuvosas os quais, em geral, partem dos "platôs" e são conduzidos por ação da gravidade por sobre as "escarpas e vertentes" até os "fundos de vales".

De acordo com os dados apresentados na Tabela 10 e na Figura 9, a área destinada às práticas agrícolas (culturas agrícolas I, II e III e solo exposto para agricultura) totaliza 58,50 km^2 e é a que ocupa o maior espaço físico do uso e da cobertura do solo na área de estudo, ou seja, 32,8%. Essas áreas se localizam nas zonas homólogas de maior altitude, os "platôs", mas também estão presentes nas de maior declividade, as "escarpas" desmatadas e "vertentes". As "escarpas" desmatadas apresentam baixa capacidade à infiltração por não possuírem mais a cobertura vegetal nativa, barreira natural ao fluxo superficial da água da chuva.

Por sua vez, a área de solo exposto, a de queimadas e a ocupada pelas estradas, ou seja, as que tiveram a remoção da quase totalidade de sua cobertura vegetal, presentes nas zonas homólogas do tipo "escarpas, vertentes e platôs", juntas, ocupam o espaço físico considerável de 24,8 km^2. Essas áreas somadas às áreas destinadas às práticas agrícolas totalizam 83,3 km^2, ou seja, 46,7% da área de estudo.

Tabela 10. Classes de uso do solo para a área de estudo.

Classe de uso do solo	Quantidade	Área total (km^2)	Zona homóloga
Açude	52	0,09	Fundo de vale e platô
Cerradão	91	2,85	Vertentes
Mata de galeria	417	13,55	Fundo de vale
Campo sujo	728	42,74	Vertentes e escarpas
Pastagem	973	16,98	Vertentes e escarpas

(continuação)

Classe de uso do solo	Quantidade	Área total (km²)	Zona homóloga
Cultura agrícola tipo I	312	16,80	Escarpas, vertentes e platôs
Cultura agrícola tipo II	14	9,01	Escarpas, vertentes e platôs
Cultura agrícola tipo III	5	0,07	Escarpas, vertentes e platôs
Solo exposto para agricultura	864	32,62	Escarpas, vertentes e platôs
Estrada	184	4,98	Todas
Queimada	162	6,13	Escarpas, vertentes e platôs
Solo exposto	1110	13,69	Todas
Reservatório	41	18,68	Fundo de vale e platô

A área de pastagem localizada nas zonas homólogas do tipo "escarpas e vertentes" totalizou 16,98 km², ou seja, 9,5% da área de estudo. Ela também não apresenta mais a cobertura vegetal característica de cerrado, conforme constatado nos trabalhos de campo, em que se observou a presença de capim plantado, especialmente, para alimentação dos rebanhos bovinos. Assim, as áreas destinadas às práticas agrícolas, as de solo exposto em geral e as destinadas à pastagem, totalizam 89% da área de estudo. Esse elevado percentual não apresenta mais sua vegetação nativa, o que, certamente, implicará maior redução da capacidade de infiltração e processos de erosão laminar mais ativos. A Figura 9 apresenta o mapa temático do uso e da cobertura do solo para a área de estudo.

4.5 Imagens obtidas para os parâmetros da EUPS

Para cada fator da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) foi produzida a sua respectiva imagem, de acordo com a metodologia citada na subseção 4.2.5.

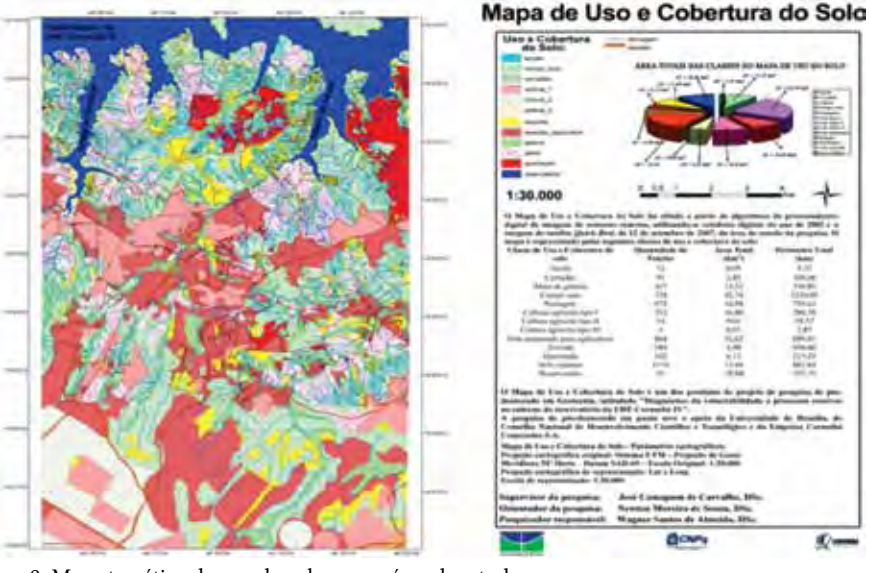


Figura 9. Mapa temático do uso do solo para a área de estudo.

4.5.1 Produção do mapa de erosividade da chuva (fator R)

A Figura 10 apresenta o mapa da erosividade da chuva, em uma escala representativa da figura de 1:70.0000, para a área de estudo, obtido por meio do aplicativo de geoestatística espacial, o interpolador "Inverso da Distância Ponderada" do ArcGis, a partir dos dados calculados de erosividade da chuva apresentados na Tabela 2 e das coordenadas geográficas da estações pluviométricas.

Figura 10. Erosividade da chuva para a área de estudo.

4.5.2 Produção do mapa de infiltrabilidade (1/k) do solo

O mapa de infiltrabilidade do solo da área de estudo foi obtido a partir de uma relação inversa dos valores do fator K apresentados nas Tabelas 3 e 8. A Tabela 11 apresenta as respectivas classes de infiltrabilidade, reclassificada em quatro faixas a partir das zonas homólogas do terreno e representadas no mapa de erodibilidade do solo, no formato de imagem com resolução espacial de 2 metros.

Tabela 11. Mapa de infiltrabilidade do solo.

Classificação da infiltrabilidade	Faixa de Infiltrabilidade
Baixa	20,00 – 23,80
Média	23,80 - 24,39
Alta	24,39 - 41,66
Muito alta	41,66 - 76,92

A Figura 11 apresenta, em sua parte superior esquerda, o mapa da infiltração do solo para a área de estudo. Observa-se que a classe de infiltração "Muito alta" é preponderante na área de estudo.

4.5.3 Produção do mapa de fator de relevo (fator LS) e dos mapas de manejo do solo e de práticas conservacionistas (fator CP)

O mapa de fator de relevo (LS) obtido pela aplicação da metodologia proposta permitiu uma melhor discriminação nos locais onde as vertentes são mais longas e de maior declividade,

coerente com as declividade e curvatura do MNT. Com base nos valores constantes na Tabela 4, foram produzidos os mapas de manejo de solo e de práticas conservacionistas, agrupados em um único fator (fator CP), no formato de imagem e na escala representativa da figura de 1:70.000. A Figura 11 apresenta os referidos mapas que compõem os parâmetros da equação da EUPS, utilizados na produção da carta geotécnica de infiltração de solos da área de estudo.

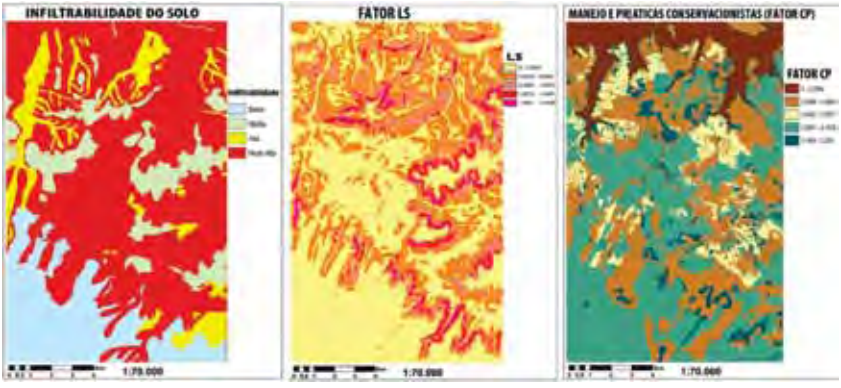


Figura 11. Mapas da EUPS modificada para infiltrabilidade da água pluvial no solo: a) parte superior direita: infiltrabilidade do solo (fator 1/K); b) parte superior esquerda: fator de relevo (fator LS); c) parte inferior direita: fator de manejo do solo e de práticas conservacionistas (fator CP).

4.6 Produção da carta geotécnica de infiltração de solos

A partir dos mapas em formatos de imagens obtidos para cada fator da EUPS foi produzida a carta geotécnica preliminar de infiltração de água no solo para a área de estudo (Figura 12). Utilizou-se a função *"raster calculator"* do ArcGis, em uma álgebra de mapas, a partir do produto dos mapas de erosividade da chuva, da erodibilidade do solo, do fator de relevo e dos fatores C e P, em formato de imagem, com dois metros de resolução espacial.

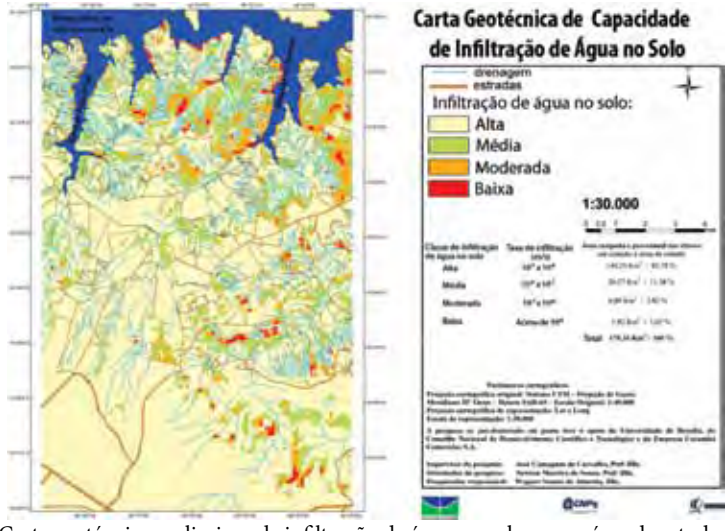


Figura 12. Carta geotécnica preliminar de infiltração de água no solo para a área de estudo.

Com objetivo de se definirem as classes de infiltração de água no solo presentes na carta geotécnica da Figura 12, foram calculadas suas respectivas áreas em ton.ha^{-1}/ano. A Tabela 12 apresenta esses resultados.

Tabela 12. Classes de infiltração de água nos solos da área de estudo.

Classe de infiltração de água no solo	Taxa de infiltração (m/s)	Área em km^2 e percentual das classes em relação à área de estudo
Alta	10^{-5} a 10^{-6}	149,29 km^2 / 83,78 %
Média	10^{-6} a 10^{-7}	20,27 km^2 / 11,38 %
Moderada	10^{-7} a 10^{-8}	6,80 km^2 / 3,82 %
Baixa	Menor que 10^{-8}	1,82 km^2 / 1,02 %
Área Total (km^2): 178,18		

Pelo exame da carta geotécnica preliminar de infiltração de água no solo constante da Figura 12 e pelos valores apresentados na Tabela 10, constata-se que a área de estudo possui uma capacidade de infiltração de água em seus solos relativamente alta, de 10^{-5} a 10^{-6} m/s em uma área de 149,29 km^2, que corresponde a 83,78 % de sua área total. Por sua vez, observa-se que, graças à ocorrência de processos erosivos laminares, as classes média e moderada ocupam, juntas, uma área de 27,07 km^2, o que corresponde a 15,2% da área de estudo, com certo comprometimento em relação à sua capacidade de infiltração. As áreas com baixa capacidade de infiltração, apesar de ocuparem uma área relativamente pequena de 1,82 km^2, localizam-se em áreas de agricultura mecanizada e, devido a essas atividades ocuparem cada vez mais as áreas de vegetação de cerrado, a capacidade de infiltração da água no solo tende a diminuir na área de estudo como um todo.

5 Considerações finais

Os resultados obtidos confirmaram a possibilidade de se adaptarem os fatores componentes da EUPS para se obter uma carta geotécnica preliminar que represente cartograficamente a capacidade de infiltração da água pluvial em um solo. Para tal, deve-se fazer a relação inversa ajustada dos fatores usados na avaliação da perda de solo causada por processos erosivos laminares. No entanto, essa relação inversa não obedece necessariamente à mesma relação de proporcionalidade para todos os fatores que a compõem, requerendo ajustes. Recomenda-se para estudos futuros uma análise mais aprofundada sobre cada fator da EUPS, nas condições regionais que possuem. No entanto, pode-se afirmar que quanto maior perda de solo obtida pela EUPS menor tende a ser a capacidade de infiltração da água no solo. O ajuste desta proposta será de grande valia na estimativa das contribuições das áreas rurais para as inundações e o surgimento de processos erosivos que têm se tornado cada vez mais frequentes.

Deve-se ressaltar que a inexistência de uma avaliação quantitativa que permitisse obter um valor mais exato da capacidade de infiltração a partir da metodologia proposta levou à opção por uma avaliação qualitativa que fornecesse indícios significativos para a capacidade de infiltração da água da chuva no solo, apresentando uma relação inversa ao potencial de perda de solo por erosão laminar. Seus fatores, como os valores elevados de erosividade da chuva,

pressupõem altos valores de escoamento superficial e, consequentemente, baixa infiltração. Uma alta erodibilidade do solo pressupõe uma elevada quantidade de areia e silte nos solos, que a princípio favorecem a infiltração. Um fator de relevo elevado pressupõe alto escoamento superficial e baixa capacidade de infiltração de água no solo. Baixos valores dos fatores C e P possuem, em um primeiro momento, relação direta à baixa capacidade de infiltração de água no solo; no entanto, o uso dos insumos agrícolas, a influência dos ciclos de molhagem e secagem e o pisoteio ou passagem de máquinas tendem a inverter essa relação.

Os resultados obtidos confirmaram que as áreas que apresentaram menor capacidade de infiltração da água no solo foram aquelas cujas transformações acarretadas por ações antrópicas na paisagem da área de estudo foram mais intensas. O aumento dessas áreas de uso do solo para atividades agrícolas mecanizadas e para pastagem, juntamente com a intensificação das queimadas e a abertura de estradas em direção ao reservatório da UHE Corumbá IV, contribuíram para uma considerável retirada da vegetação nativa de cerrado existente, com consequente diminuição da capacidade de infiltração do solo nesses locais. Essas áreas com baixa capacidade de infiltração tendem a aumentar devido à expansão das áreas de agricultura mecanizada, conforme representado na carta geotécnica preliminar de infiltração da água no solo.

Assim, os resultados obtidos permitem concluir que, apesar de possuir apenas seis anos em operação, o empreendimento da UHE Corumbá IV, no entorno de seu reservatório, já apresenta perda considerável de solo carreada por processos erosivos laminares, o que contribui para o seu assoreamento e para a redução da capacidade de infiltração de água no solo do seu entorno.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional Científico e Tecnológico (CNPq) e a empresa Corumbá Concessões S.A., controladora da UHE Corumbá IV, o apoio à pesquisa em pauta.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) NBR 7185: Solo – Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996). NBR 13602: Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997). NBR 10703: Peneiras de Ensaio – Aberturas. Rio de Janeiro, 7 p.

ALMEIDA, W. S.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SOUZA, N. M. (2008). Diagnóstico da vulnerabilidade ambiental a processos erosivos no entorno do reservatório da UHE Corumbá IV. Brasília: Universidade de Brasília. 185 p. (G.PQ.GEOP – 02/2008).

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (1990). Conservação do solo. 3. ed. São Paulo: Ícone. 355 p.

BRINK, A. B.; MABBUTT, J. A.; WEBSTER, R. (1966). Report of the working group on land classification and data storage. Hampshire, UK: Military Experimental Establishment Report, n. 940. 97 p.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. (1992). Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. Bragantia, Campinas, v.51, n.2 p. 189-196.

MOORE, I.; BURCH, G. (1996). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. Soil Science Society of America Journal, n. 50, p. 1294-1298.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S; BELZ, J. E. (2005). An assessment of the SRTM topographic products. Pasadena, US, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory. 143 p.

SCHOWENGERDT, R. A. (1983). Techniques for image processing and classification in Remote Sensing. Orlando, US: Academic Press. 248 p.

SIEG (2007). Sistema estadual de estatística e de informações geográficas de Goiás. Mapas em formato *shapefile*. Disponível em: www.sieg.go.gov.br. Acesso em: 10 jul. 2007.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; LANI, J. L.; OLIVEIRA, T. M. (2010). Sistemas de classificações geotécnicas de solos: estudo de caso aplicado à rodovia VCS 346. Revista de Solos, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 313-321.

VALE JUNIOR, J. F; BARROS, L. S.; SOUSA, M. I. L.; UCHOA, S. C. P. (2009). Erodibilidade e suscetibilidade à erosão dos solos de cerrado com plantio de *Acacia mangium* em Roraima. Revista Agro@mbiente On-line, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, RR, v. 3, n. 1, p. 1- 8.

WISCHMEIER, W. H.; D. D. SMITH. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**.** U.S. Department of Agriculture, Washington. 58 p.

Capítulo 31
Infiltração em pavimento: problemas e soluções

José Camapum de Carvalho
Márcio Muniz de Farias
Lilian Riberio de Rezende

1 Introdução

Na construção de calçadas, pistas de ciclismo, ruas, avenidas, rodovias, pistas de aeroportos e estacionamentos, geralmente a drenagem tem como objetivo tão somente escoar o volume de água que tende a se acumular na superfície em consequência da impermeabilização gerada por tais construções. Com isso, são deflagrados outros problemas, como redução da recarga dos aquíferos, erosões e assoreamentos, muitos dos quais geram danos para as próprias construções que lhes deram origem. Nesses casos, o aumento da infiltração pode constituir uma alternativa viável de solução de tais problemas.

Apesar de a infiltração ser, muitas vezes, solução técnico-ambiental para problemas oriundos da impermeabilização da superfície do terreno, se mal planejada ou se permitida em determinadas situações, também pode transformar-se na origem de graves problemas técnicos e ambientais.

Este capítulo abordará a infiltração sob dois ângulos em relação às citadas construções: a infiltração como problema e a infiltração como solução. No entanto, não serão tratadas aqui de modo detalhado as valas e as trincheiras de infiltração, uma vez que estas são consideradas nos capítulos 16 e 17 deste livro.

2 Pavimentos drenantes

No escopo deste capítulo, o termo pavimento é usado para denotar a estrutura de suporte em calçadas, pistas de ciclismo, ruas, avenidas, rodovias, pistas de aeroportos e estacionamentos. O termo estrutura de pavimento será usado para tratar do todo: revestimento e camadas suporte (base, sub-base e reforço de subleito). Não serão distinguidos os pavimentos quanto à questão da rigidez. Eles serão tratados apenas no que se refere à questão da drenagem.

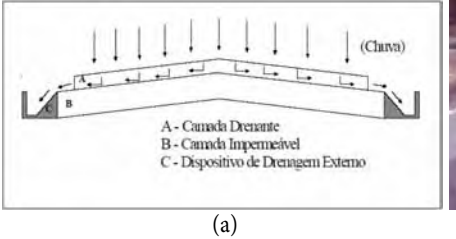
Quanto à drenagem, os pavimentos podem ser classificados como: pavimentos convencionais impermeáveis, pavimentos drenantes e pavimentos permeáveis. Destaca-se que os pavimentos intertravados podem ser considerados quanto à drenagem em três categorias: a) pavimentos impermeáveis quando assentes sobre base imprimada e rejuntados com massa asfáltica ou argamassa de cimento Portland; b) pavimentos drenantes quando assentes sobre

base granular sobrepondo-se a camada imprimada, e c) pavimentos permeáveis quando a água que se infiltra através do revestimento é drenada para o subleito sem maiores impedimentos.

A maioria dos pavimentos usados em calçadas, ciclovias, ruas, avenidas, rodovias, aeroportos e estacionamentos possui como revestimento materiais impermeáveis ou de permeabilidade muito baixa, pois um dos seus objetivos é evitar que as águas pluviais infiltrem na estrutura de pavimento. Essas infiltrações são geralmente indesejáveis por propiciarem, na maioria dos casos, a perda de capacidade de carga das camadas que compõem a estrutura de pavimento (base, sub-base, reforço de subleito) e do subleito, possibilitando o surgimento de trincas e deformações excessivas na superfície de rolamento. Os materiais geralmente usados no revestimento dessas estruturas de pavimentos são as misturas asfálticas e o concreto de cimento Portland. Para facilitar o escoamento superficial e a captação das águas pluviais pelos sistemas de drenagem, a superfície do pavimento é geralmente dotada de declividade transversal variando de 1% a 3% em vias urbanas (PMSP, 2004) e de 2% a 10% em rodovias (DNER, 1973).

Sem que se mudem os materiais utilizados na construção dos revestimentos, foram propostas no meio técnico duas soluções que conduzem a infiltração das águas pluviais: os pavimentos drenantes e os pavimentos permeáveis.

Os pavimentos drenantes de concreto asfáltico têm por finalidade reduzir o nível de ruído e, principalmente, infiltrar de imediato a parte da água da chuva que cai sobre o revestimento, evitando a formação de um filme de água crítico sobre a superfície do pavimento, o que pode resultar em aquaplagem dos veículos. Nesse caso, a estrutura de pavimento é dotada de camada de mistura betuminosa porosa que se sobrepõe a uma camada de mistura betuminosa densa e de muito baixa permeabilidade (Figura 1). A água que se infiltra na camada porosa superior é coletada em sistemas de drenagem. Portanto, o objetivo ambiental se restringe à redução do nível de ruído, sendo a segurança o foco principal da solução de engenharia.



(a)

(b)

Figura 1. Pavimentos drenantes: (a) corte esquemático; (b) revestimento em camada porosa de atrito (CPA) em construção (lado direito da pista) na Estrada do Coco, Bahia.

Os pavimentos permeáveis são aqueles construídos com a finalidade de possibilitar a infiltração das águas pluviais ou de parte das águas pluviais que caem sobre sua superfície, transferindo a água infiltrada diretamente para o solo subjacente, o que permite uma recarga parcial do lençol freático. Esses pavimentos são construídos com blocos de concreto que trabalham de modo intertravado (Figura 2a), ou ainda com pequenos blocos talhados na

rocha os quais são geralmente dotados de menor nível de travamento, mas de maior capacidade de infiltração através das juntas devido às irregularidades nos contatos entre eles (Figura 2b). Cabe destacar que esses pavimentos podem ainda possuir apenas revestimento primário, como mostrado na Figura 2a. Esse tipo de revestimento permeável tem sido recomendado quando se busca preservar o balanço hídrico pré-existente. Entretanto, muitas vezes são usados de modo inapropriado em relação a esta finalidade. A Figura 2b, por exemplo, mostra que tanto nos paralelepípedos pré-existentes como nos que estão sendo assentados foi usada argamassa de rejuntamento, o que resulta em acúmulo de água que permanece no local após uma precipitação pluviométrica. Cabe destacar que o rejuntamento, embora minimize em curto prazo o efeito da infiltração, a médio e longo prazo termina trincando e permitindo a passagem da água da chuva com o agravante de que, dada a sua menor permeabilidade, os afundamentos gerados na via acabam por propiciar o indesejado acúmulo de água.

Figura 2. Pavimentos permeáveis: a) bloquetes de concreto intertravados e revestimento primário em brita; b) bloquetes de pedra.

Pavimentos intertravados rejuntados e assentes sobre base imprimada quase sempre têm finalidade mais paisagística do que ambiental. Quando não são rejuntados, mas ainda são assentes sobre base imprimada visando proteger o solo de suporte contra a perda de resistência e rigidez oriunda da água da chuva que infiltra através das juntas, elimina-se sua principal função ambiental, a infiltração necessária à preservação do balanço hídrico original. Nos casos em que sobre a base imprimada é colocada uma camada granular de assentamento mais espessa, essas estruturas de pavimento podem desempenhar papel semelhante ao do pavimento drenante de concreto asfáltico, servindo de elemento condutor da água infiltrada para sistemas de drenagem coletores.

Finalmente, citam-se os pavimentos intertravados permeáveis que podem ser considerados como drenantes propriamente ditos. Nesses casos, o rejuntamento é feito com areia, e os blocos são assentados sobre uma camada de areia diretamente sobre a base não imprimada. Essas estruturas de pavimento têm a função ambiental de possibilitar a infiltração das águas pluviais que passam através de suas juntas. Mesmo nesses casos, a superfície do pavimento não pode ser considerada como totalmente permeável, uma vez que os blocos em si são geralmente impermeáveis e apenas uma pequena fração da área superficial, correspondente às juntas entre os blocos, permite a infiltração da água. Destaca-se, porém, que tais blocos podem ser concebidos de material poroso passando a atuar como superfície de infiltração.

A escolha do tipo de pavimento deve passar sempre por análises técnico-ambientais, lembrando que, na questão econômica, o passivo ambiental, embora de difícil valoração, deve sempre ser considerado.

Além das infiltrações desejáveis que ocorrem a partir da superfície dos pavimentos drenantes, podem ainda ser implantados sistemas de infiltração junto às citadas construções para dar vazão às águas pluviais provenientes das áreas por elas impermeabilizadas. Nesse caso, os sistemas de infiltração mais comuns são as trincheiras e as valas de infiltração discutidos no Capítulo 16 deste livro e ilustradas na Figura 3 a seguir.

Figura 3. Trincheira de infiltração junto à BR 060, próximo à cidade de Anápolis, Goiás.

Apesar de a construção dos pavimentos drenantes ser, muitas vezes, desejável como sistema de infiltração concebido objetivando a solução de problemas técnicos e/ou ambientais, a infiltração da água da chuva a partir da superfície dos pavimentos convencionais ocorre quase sempre de modo indesejável por meio de fissuras que surgem no revestimento e se propagam para as demais camadas, ou vice-versa. As infiltrações indesejadas acabam quase sempre por gerar problemas para a estrutura de pavimento como um todo.

3 Infiltrações indesejáveis a partir das estruturas de pavimento

É comum no Brasil a ocorrência de problemas devido a infiltrações de águas pluviais em áreas pavimentadas em consequência da falta de manutenção preventiva. A infiltração da água da chuva através do revestimento, quando não prevista, pode gerar vários efeitos deletérios para a estrutura de pavimento, sendo os mais comuns a perda da capacidade de carga das camadas de base, sub-base e subleito e o bombeamento de finos presentes nas camadas de base, comprometendo ainda mais a sua capacidade de suporte. Esses são casos em que a infiltração das águas pluviais na estrutura de pavimento é indesejável. Tais problemas são geralmente mitigados por meio de manutenções preventivas, fazendo-se, por exemplo, o selamento das trincas em períodos que antecedem o período chuvoso.

As trincas no revestimento de pavimentos, na maioria das vezes, estão associadas a fatores ambientais, como envelhecimento do revestimento, ou a problemas estruturais, como fadiga da estrutura de pavimento, havendo ainda as trincas de tração na crista de aterros. Embora a literatura pouco se reporte a elas, podem ainda ocorrer fissuras no revestimento e

na estrutura de pavimento como um todo, ligadas à atuação tensões de expansão e contração nas camadas de base, sub-base e subleito oriundas de variações de sucção no solo suporte. Camapum de Carvalho (2006) e Camapum de Carvalho e Gitirana (2005) descrevem um caso em Urucu, estado do Amazonas, no qual a estrutura de pavimento com revestimento em areia asfalto usinada a quente (AAUQ) apresentou trincas decorrentes da retração da base, deteriorando-se após alguns meses de uso. Nesse caso específico, as trincas longitudinais ocorriam ao longo da crista de aterros de pequena altura (2 m a 3 m) e as trincas transversais eram observadas nos locais onde a terraplanagem correspondia apenas à altura das camadas de base e sub-base (Figura 4).

As trincas oriundas de movimentos de expansão ou contração nas camadas de base, sub-base e subleito, quando devidas a movimentos de contração, devem passar por manutenção preventiva antes do período chuvoso. No entanto, se as trincas forem oriundas de movimentos de expansão, os quais ocorrem no período chuvoso, a manutenção deve ser realizada de modo continuado, pois a expansão, e por consequência as trincas, é decorrente da própria precipitação.

Figura 4. Trincas oriundas de variações de sucção nas camadas de base, sub-base e subleito.

No caso de as trincas no revestimento serem oriundas de problemas de dimensionamento ou execução, a solução pode se tornar mais dispendiosa e demorada por implicar intervenções mais amplas na estrutura de pavimento. Nesses casos, o selamento das trincas de modo preventivo não deixa de ser um paliativo que melhora as condições da estrutura de pavimento, sem que, no entanto, se resolva em definitivo o problema. Aqui e nos demais casos, o termo manutenção preventiva ou selamento preventivo de trincas se refere a intervenções saneadoras dos problemas antes do período chuvoso. A Figura 5 ilustra o caso de uma pista de ciclismo existente em um condomínio residencial localizado em Lauro de Freitas, no Estado da Bahia. Provavelmente a falta de rigor construtivo levou ao aparecimento de trincas no revestimento da via, demandando o seu selamento. A Figura 6a mostra que houve retenção da água da chuva no local onde a trinca foi preventivamente selada; ao contrário, onde esta não foi efetuada, a água se infiltrou na estrutura de pavimento (Figura 6b). Cabe aqui destacar

que, mesmo em uma via onde a solicitação do tráfego é desprezível, como é o caso dessa pista de ciclismo, a selagem das trincas que surgem no revestimento é importante para evitar uma deterioração acelerada e prematura do pavimento.

Figura 5. Pista de ciclismo com trincas seladas, em Lauro de Freitas, Bahia.

Figura 6. a) Água da chuva retida por revestimento com trincas seladas; b) águas pluviais infiltradas através das fissuras não seladas no revestimento.

Em vias com maior volume de tráfego, a selagem preventiva das trincas assume grande relevância, quase que independentemente da origem do problema. Quando a deterioração da via atinge uma situação crítica, principalmente por falta de manutenção preventiva, como a mostrada na Figura 7, remendos e operações tapa-buraco (Figura 7a) já não surtem efeito, pois, com a passagem de veículos pesados, ocorre o bombeamento do material de base (Figura 7b), gerando mais danos na estrutura de pavimento como um todo. Infiltrações como essas são, portanto, indesejáveis e devem ser evitadas por meio de manutenção preventiva.

Figura 7. a) Estrutura de pavimento danificada; b) bombeamento de finos – Distrito Federal.

4 Problemas oriundos do lançamento de sistemas de drenagem de pavimentos

Não raro o lançamento de água proveniente de sistemas de drenagem de águas pluviais implantados em ruas, avenidas, rodovias, aeroportos e estacionamentos geram problemas, como erosões. Nesse caso, a solução geralmente passa pela execução de lançamentos apropriados ou pela implantação de sistemas de drenagem. A Figura 8 ilustra o caso em que a falta de infraestrutura de drenagem de águas pluviais proporcionou o surgimento de uma grande voçoroca na margem esquerda da rodovia BR 070, próximo à cidade satélite de Ceilândia, no Distrito Federal. Em casos como esse, em que o fluxo é oriundo de áreas urbanas, tem-se o somatório das águas pluviais provenientes de todas as áreas impermeabilizadas, ou seja, ruas, avenidas, estacionamentos e edificações.

Figura 8. Voçoroca junto à BR 070 oriunda de águas pluviais provenientes de Ceilândia, no Distrito Federal.

Junto a rodovias é comum o surgimento de erosões deflagradas a partir de escavações de empréstimos feitos na lateral da via para utilização no terrapleno. Para combater o efeito erosivo da água em trechos de declive, geralmente se adota a construção de bacias de retenção, as quais quase sempre se rompem por falta de projeto adequado, como mostram as Figuras 9a ao lado da rodovia BR 060 e a Figura 9b ao lado da DF 250, próximo à cidade satélite do Paranoá. Em casos como esses, em que o problema é de difícil solução devido ao grande volume de água escoado superficialmente, deve-se implantar obras complementares, como trincheiras e valas, destinadas à infiltração.

Figura 9. a) Bacias de retenção junto à rodovia BR 060; b) Bacia de retenção junto à rodovia DF 250.

5 Alguns exemplos de pavimentos permeáveis

A Figura 10 ilustra uma estrutura de pavimento intertravado construído em condições extremamente favoráveis à infiltração. Nesse caso específico, dadas as condições locais, praia de Boa Viagem em Recife, Estado de Pernambuco, certamente o objetivo maior foi o paisagístico. Igualmente com finalidade paisagística são apresentados exemplos de pavimentos drenantes implantados na Costa do Sauípe, Estado da Bahia (Figura 11). Cabe destacar que, quando se prioriza o aspecto paisagístico em casos como esses, está-se buscando valorizar o aspecto ambiental relativo à integração do projeto às belezas naturais, o que de algum modo preserva pelo menos em parte a qualidade de vida no que tange ao cenário.

Figura 10. a) Intertravado em calçada e ciclovia; b) concreto asfáltico em contraste com o intertravado em ciclovia - Boa Viagem, Recife, Estado de Pernambuco.

Figura 11. a) Pavimento permeável em madeira; b) contraste entre calçada com pavimento intertravado vazado e feita com concreto de cimento Portland – Costa do Sauípe, Estado da Bahia.

Observa-se, na Figura 10b, que ocorre um choque visual na ciclovia entre o pavimento intertravado e o pré-existente em concreto. Nesse caso, o choque provavelmente se deve ao avanço da pista de ciclismo sobre a avenida pré-existente. Já na Figura 11b, o choque visual entre a calçada em blocos intertravados vazados e a calçada em concreto que ocorre na bifurcação não permite vislumbrar uma justificativa técnico-ambiental plausível.

A Figura 12a apresenta um pavimento de um condomínio em Lauro de Freitas, na Bahia, executado em bloquetes de pedra intertravados e rejuntados com argamassa, o que conduziu à impermeabilização da superfície. Já a Figura 12b apresenta o pavimento existente na área do SENAI, na mesma cidade. Ele foi executado em bloquetes de concreto intertravados e aparen-

temente teve parte de suas juntas colmatadas por sedimentos, impedindo a infiltração da água da chuva que se acumula nos pontos que sofreram subsidência.

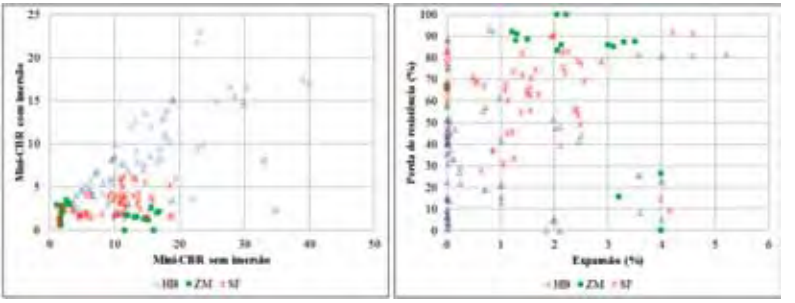
Figura 12. a) Intertravado em bloquetes de pedra; b) intertravado com bloquetes de concreto – Lauro de Freitas, Estado da Bahia.

Do conjunto de imagens mostrados nesta seção, sobressai que os pavimentos intertravados podem representar situação extremamente favorável à infiltração, mas podem também ser construídos ou mantidos sem qualquer preocupação com esse aspecto.

6 Influência da umidade no comportamento dos solos tropicais

Apesar da designação genérica dada aos pavimentos intertravados como sendo pavimentos drenantes, o foco principal do seu estudo tem se concentrado no desempenho estrutural e no aspecto paisagístico que podem apresentar. Nesta seção, porém, serão abordados apenas os pavimentos drenantes propriamente ditos, ou seja, os intertravados permeáveis.

Antes de discutir a questão da drenagem e infiltração, cabe destacar a influência da saturação no comportamento dos solos tropicais finos compactados, materiais muitas vezes utilizados como camadas de fundação nas estruturas de pavimento submetidas a baixo volume de tráfego. A Figura 13 mostra a influência da saturação nos valores de mini-CBR determinados para solos compactados, variando-se a energia e umidade de compactação (DELGADO, 2007). Observa-se, na Figura 13a, que a influência da saturação no comportamento mecânico do solo tende a ser maior quanto menor for o grau de intemperização do solo, destacando que HB corresponde a um solo profundamente intemperizado (solo laterítico), ZM ao solo de transição (zona mosqueada) e SF a um solo pouco intemperizado (solo saprolítico fino). Apesar da dispersão, pois foram tratados conjuntamente os resultados de diferentes solos compactados em diferentes condições de energia e umidade, a Figura 13b mostra que os solos pouco intemperizados tendem a apresentar maior perda de resistência com a expansão oriunda da saturação, enquanto os profundamente intemperizados apresentam a menor perda. Os solos de transição tendem a apresentar valor intermediário. As propriedades químicas e mineralógicas desses solos encontram-se apresentadas em Cardoso (2002).



(a) (b)

Figura 13. Comportamento de solos finos do Distrito Federal: a) CBR; b) expansão.

Conclui-se destes resultados que os solos profundamente intemperizados são geralmente menos sensíveis a água quando compactados; porém, no estado natural, podem apresentar colapso e subsidência significativa. Em solos pouco intemperizados, os problemas se associam à perda de resistência e a maior expansão.

Apesar de os perfis de solos tropicais marcarem a maior parte do território brasileiro, é certo que solos distintos também se fazem presentes, como é o caso favorável à implantação dos pavimentos drenantes das dunas e dos depósitos de areia presentes na região costeira. Existem também, apesar de certo grau de intemperismo sofrido pelo solo, situações adversas, como é o caso dos solos de Urucu no Estado do Amazonas, onde o elevado nível de precipitação conduz o nível d'água a aflorar no período chuvoso, e a necessidade de preservação ambiental impede grandes movimentos de terra para elevação do greide. Esses solos foram bastante estudados por Pessoa (2004), que mostrou que quase sempre os solos regionais usados na construção rodoviária eram dotados de expansão, refletindo níveis de intemperização não muito elevados. A Figura 14a mostra que, para tais condições, a subpressão pode propiciar a total destruição do revestimento, principalmente quando este apresenta limitações estruturais decorrentes talvez da escassez de material apropriado para a preparação das misturas asfálticas. O pavimento drenante propriamente dito, no caso um intertravado permeável (Figura 14b), vai desempenhar dupla função: a) no período de maior nível de precipitação, atuará aliviando as subpressões e, b) no período onde ocorre o rebaixamento do lençol freático, atuará possibilitando a recarga do aquífero. Esse tipo de solução foi adotado em Urucu, Estado do Amazonas, nos trechos submetidos a baixíssimo volume de tráfego.

(a) (b)

Figura 14. a) Estrutura de pavimento em AAUQ; b) pavimento intertravado permeável – Urucu, Estado do Amazonas.

7 Considerações sobre o projeto e a construção de pavimentos permeáveis

Embora as discussões apresentadas neste capítulo abordassem diferentes aspectos relativos aos pavimentos drenantes e permeáveis, o seu objetivo principal é a apresentação dessas alternativas de projeto, objetivando a infiltração das águas pluviais oriundas da própria via.

As recomendações de projeto geralmente encontradas na literatura (ABNT, 1987a; ABNT, 1987b; ABCP 2012a, ABCP 2012b; PMSP, 2004) priorizam a capacidade estrutural do pavimento. Sabe-se também que as duas funções, capacidade estrutural e infiltração, não apresentam geralmente compatibilidade entre si, conforme se depreende dos resultados apresentados na seção anterior; tais questões, entretanto, não serão aqui discutidas. Este item dará ênfase à infiltração.

Para melhor acompanhamento das discussões, a Figura 15 apresenta um croqui ilustrando o conceito proposto para a composição de uma estrutura de pavimento realmente drenante. Destaca-se que a vala e a base no papel de colchão drenante não constituem elementos normalmente adotados, mas que estão sendo introduzidos, pois, com projeto adequado e execução cuidadosa, ambos poderão atuar compondo a drenagem do pavimento, principalmente em vias de tráfego leve e/ou com baixo volume de tráfego. Nesse caso, a camada de base passa a assumir papel inverso ao convencionalmente adotado para os colchões drenantes em rodovias, ou seja, em lugar de drenar a fundação, ela tem a função de atuar como elemento de armazenamento e distribuição da infiltração. No sistema proposto, os drenos existentes na estrutura confinante permitem a passagem de água da vala para o colchão drenante.

Na concepção de projeto proposta, nos casos de inexistência da vala destinada a coleta do volume excedente de águas pluviais da via, por exemplo, quando o próprio pavimento for drenante, tornando-a desnecessária, o meio-fio deverá constituir-se também em elemento de confinamento.

Introduziu-se também nesta proposta a presença de uma camada de geotêxtil sob a camada de assentamento, objetivando proteger a camada drenante contra eventuais colmatações por sedimentos oriundos da superfície do pavimento. Destaca-se, porém, que, quando bem definida e executada, a própria camada de assentamento poderá desempenhar o papel de filtro para o colchão drenante.

É evidente que essa solução só funcionará em vias horizontais; para perfis inclinados, poderá ocorrer sobre a superfície do pavimento à montante a saída da água infiltrada à jusante.

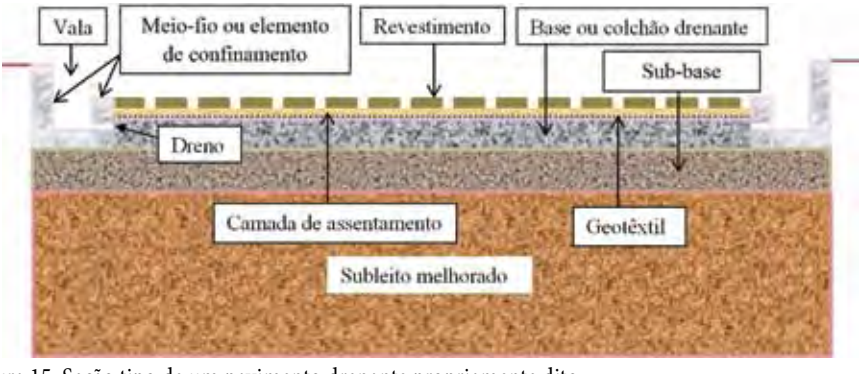


Figura 15. Seção tipo de um pavimento drenante propriamente dito.

Cabe lembrar que, nas soluções em que são adotados pavimentos permeáveis, é fundamental a observação de critérios de compatibilidade técnico-ambiental. Nesse sentido, um primeiro aspecto a ser considerado diz respeito à origem dos elementos estruturais de revestimento, pois, como indicado no texto, os pavimentos intertravados construídos com bloquetes de pedra tendem a apresentar, devido à irregularidade de sua forma, juntas mais espessas que favorecem à infiltração das águas pluviais que caem sobre o revestimento. Um segundo aspecto está ligado à forma dos elementos manufaturados. Aqueles vazados, como os mostrados na Figura 11b, apresentam maior capacidade de drenagem que os maciços (Figura 10a). Existem ainda, embora pouco usados e requerendo cuidados com a manutenção de sua capacidade drenante, os elementos estruturais porosos que permitem a infiltração das águas pluviais.

Levando-se em conta tais aspectos, o primeiro cálculo a ser feito diz respeito à capacidade de drenagem das juntas de travamento, dos furos se o elemento for vazado e dos poros se o elemento estrutural for drenante. Calculando-se a capacidade drenante e levando-se em conta a taxa de infiltração (permeabilidade) da camada de assentamento, é possível determinar, ainda que de modo aproximado, o volume precipitado passível de ser infiltrado, devendo o restante ser conduzido aos sistemas de drenagem convencionais ou alternativos, como é o caso das trincheiras e valas de infiltração.

Devido à possibilidade de colmatação do sistema de drenagem superficial (juntas, furos, elementos estruturais porosos), recomenda-se atenção especial para se evitar o aporte de sedimentos para a superfície do pavimento.

Embora seja possível realizar operações de prevenção e manutenção, deve-se utilizar as condições de fluxo mínimas aceitáveis ou admitidas na determinação da capacidade de infiltração. Por exemplo, se for admitido que as manutenções de limpeza das juntas serão realizadas a cada seis meses e que nesse espaço de tempo se perdem 30% da capacidade de drenagem, deve-se efetuar o cálculo da capacidade de drenagem considerando-se apenas 70% da capacidade nominal do material.

Em breve cálculo estimativo e exemplificativo, é possível constatar que uma estrutura de pavimento executada em bloquetes retangulares maciços medindo 9,5 cm x 19,5 cm x 5 cm de altura e possuindo em média 5 mm de junta preenchida com areia cuja permeabilidade média é de 10^{-4} m/s, apresentará uma capacidade de infiltrar através das juntas uma lâmina d'água de aproximadamente 5 mm quando ocorrer uma precipitação de 10 mm em uma hora. Cabe ressaltar que, se por um lado a capilaridade da areia tenderá inicialmente a acelerar a infiltração, em seguida, caso a fase ar torne-se oclusa, ela vai operar como barreira à infiltração, o que leva a considerar o valor apresentado como mera estimativa.

Ultrapassada a camada estrutural correspondente aos intertravados, chega-se à camada de assentamento em areia na qual o fluxo tende a se espalhar e percolar para a camada de base. A camada de base deve, no caso dos pavimentos intertravados permeáveis, ser constituída preferencialmente por material pétreo estruturalmente insensível à água e com volume de poros com capacidade para armazenar a água infiltrada no período de acumulação, considerado em função da duração continuada das chuvas com pequenas intermitências. Para o cálculo do volume de poros, deve-se operar com o balanço hídrico, tendo-se como entrada o volume acumulado que se infiltrará na superfície do pavimento e tendo como saída o volume capaz de se infiltrar na sub-base ou no subleito no mesmo período de acumulação considerado. Cabe destacar que geralmente os manuais de execução recomendam a remoção e compactação do subleito em uma espessura de 60 cm, sendo a compactação realizada de modo a que se

obtenha Grau de Compactação igual a 100% em relação à energia Proctor Normal. Deve-se levar em conta o fato de que essa compactação reduzirá a capacidade de infiltração do sistema como um todo.

Com base no exposto nesta seção, verifica-se a possibilidade de calcular o volume de água a ser infiltrado através dos pavimentos drenantes propriamente ditos e determinar a demanda por sistemas de drenagem complementares.

Castro (2011) realizou um estudo experimental em diferentes seções de pavimentos permeáveis executados com bloco pré-moldado maciço, bloco pré-moldado vazado e placa de concreto poroso submetidos a diferentes simulações de chuva. A estrutura onde foi utilizado o bloco maciço apresentou resultados satisfatórios apenas para chuvas de menor intensidade (inferior a 69 mm/h). As seções executadas com bloco vazado e concreto poroso apresentaram pouco ou nenhum escoamento superficial. Os altos valores de volume acumulado de infiltração (27 mm a 46 mm) mostram resultados positivos referentes ao armazenamento temporário de água e no incremento da infiltração. O retardo e o prolongamento nos tempos críticos do hidrograma de escoamento superficial também garantiram bons resultados ao revestimento de concreto poroso. Como estrutura adequada de pavimento permeável, nesse estudo recomendou-se sub-base de brita 1 ou cascallho com 7 cm de espessura revestida com geotêxtil, base de areia com 7 cm de espessura e revestimento permeável.

8 Considerações finais

Este capítulo, após levantar alguns problemas que podem ter origem na infiltração de águas pluviais em estruturas de pavimento, indicou o procedimento a ser adotado no cálculo da capacidade de infiltração das estruturas de pavimento com finalidade de drenagem.

Essas estruturas de pavimento podem, segundo o seu tipo, desempenharem três funções ambientais de modo acumulado ou não: a) servir como elemento paisagístico, b) reduzir o nível de ruídos e c) possibilitar a infiltração, tendo por consequências a recarga dos aquíferos e a redução do escoamento superficial.

Os pavimentos permeáveis podem ser usados em vias submetidas a baixo volume de tráfego, em ciclovias, em calçadas e em estacionamentos. Problemas estruturais poderão ser evitados mediante adequada concepção de projeto.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2012a). Prática recomendada PR-1: pavimentos intertravados. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2010/01/pr1_intertravados.pdf>. Acesso em: 04 maio 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2012b). Prática recomendada PR-2: pavimentos intertravados. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2010/01/pr2_intertravados.pdf. Acesso em: 04 maio 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987a). NBR-9780: Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987b). NBR-9781: Peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT. 3 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2006). Análise de problemas relativos à construção rodoviária na Região Amazônica. *In*: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 3, 27 a 31 de agosto de 2006, Curitiba, PR. Curitiba, PR: ABMS, p. 113-118.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G. F. N. (2005). Considerações sobre parâmetros de resistência de solos tropicais. *In:* SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 2, 27 a 29 de outubro de 2005, Goiânia, GO. Goiânia, GO: Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, pp. 183-191.

CARDOSO, F. B. F. (2002). Caracterização físico-química e estrutural de solos tropicais do Distrito Federal. Brasília: UnB. 357 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DT – 009A/02.

CASTRO, T. Q. (2011). Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis. Goiânia: UFG. 91 fl.. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

DELGADO, A. K. C. (2007). Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária. Brasília: UnB. 392 fl.. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.DT – 045A/07.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1973). Normas para o projeto das estradas de rodagem. Ministério dos Transportes. Brasília, DF: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 16 p.

PESSOA, F. H. C. (2004). Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Brasília: UnB. 151 fl.. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, G.DM – 117A/04.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (2004). IP-03 Instrução de projeto geométrico. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo. 21 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (2004). IP-06 Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo. 12 p.

Capítulo 32

Considerações sobre aspectos relacionados aos sistemas de infiltração de águas pluviais

José Camapum de Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Eufrosina Terezinha Leão Carvalho

1 Introdução

Como fechamento deste livro, seus organizadores apresentam este capítulo de cunho mais filosófico que técnico, levantando aspectos importantes sobre os sistemas de infiltração e seus possíveis impactos ambientais. O objetivo do capítulo é fazer uma síntese dos aspectos que influenciam os sistemas de infiltração compensatórios e as suas eficiências. Destaca-se que, como critérios de eficiência, serão consideradas a capacidade de infiltração e as limitações impostas pelos riscos que a infiltração oferece ao equilíbrio ambiental e às obras de engenharia. Serão discutidos, sem a pretensão de ser exaustivo quanto ao número e à abrangência dos temas, aspectos sobre a infiltração que exigem maior reflexão. Serão abordados temas como educação, legislação, clima, interação solo-atmosfera, qualidade da água, forma do relevo, cobertura da superfície do solo, perfil de intemperismo e sistemas de infiltração, considerando-se as principais formas geo étricas, comportamento do solo frente à infiltração e riscos como os de rupturas de encostas, subsidências, comprometimento de construções e de erosões. Todos esses temas foram tecnicamente tratados com muita competência ao longo deste livro, e os capítulos nele apresentados constituem uma contribuição de grande relevância para aqueles que pretendem se dedicar a estudar, projetar e executar sistemas de infiltração.

2 Educação e legislação

Os dois pontos de partida para a solução dos problemas ambientais ligados ao excesso de impermeabilização e dificuldade de tornar efetivo o uso de sistemas de infiltração compensatórios são: a formação de uma consciência na sociedade e o estabelecimento de normas eficientes e efetivas, sejam elas de cunho técnico, administrativo ou jurídico.

A educação formadora da consciência ambiental deve fundamentar-se em informações e tecnologias criteriosamente estabelecidas (com bases científicas comprovadas e aplicabilidade devidamente avaliada). É também indispensável que os produtos das atividades de pesquisa e desenvolvimento realizadas com sucesso nas universidades e centros de pesquisa

sejam disponibilizadas em linguagem acessível e aplicadas nas cadeias de ensino formal e não formal, atingindo os diferentes níveis de formação acadêmica, inclusive os analfabetos.

A legislação, por sua vez, deve ser, na medida do possível, objetiva e, sobretudo, efetiva. A formação da consciência ambiental anteriormente mencionada constitui-se em caminho para a efetividade das normas, pois a voz de comando interior (a iniciativa espontânea do indivíduo) sempre prepondera sobre a exterior (as normas impostas pela sociedade, pelo Estado), mesmo que essa última se revista de caráter punitivo. A consciência individual reduz também o custo da fiscalização, pois o vigiar é interiorizado, passando a atuar no campo da consciência.

As normas técnicas voltadas para a implantação de sistemas de infiltração devem fixar estudos preliminares voltados para a avaliação dos riscos geotécnicos e ambientais que podem surgir com sua implantação. Devem, por exemplo, exigir estudos sobre os riscos de colapso ou expansão, conforme o solo, e de erosão interna. Deve ainda prever a avaliação dos eventuais impactos sobre a própria obra e sobre estruturas vizinhas, pois é sabido que tanto a elevação do nível d'água freático como o próprio aumento de umidade do solo não saturado afeta o seu comportamento mecânico e hidráulico.

As normas administrativas devem fixar critérios para a adoção de sistemas de infiltração compensatórios. Tais critérios devem ser considerados durante os estudos preliminares sobre o potencial de ocupação e uso do solo, fundamentando-se em estudo dos riscos em caráter geral. Elas podem ainda, segundo os riscos e as características locais, exigir estudos complementares em casos específicos. No caso do espaço urbano, as diretrizes sobre sistemas compensatórios de infiltração devem fazer parte do Plano Diretor. Em um segundo nível, já contemplando questões mais específicas a cada área de ocupação, devem vir as normas fixadas nos códigos de obra adotados pelos municípios. Ainda no plano administrativo, devem ser fixadas normas de monitoramento de aspectos climáticos, como temperatura, umidade relativa, precipitação e qualidade da água da chuva, de modo a subsidiar os estudos técnicos voltados para a implantação e manutenção dos sistemas de infiltração. Esse monitoramento deve prioritariamente ficar a cargo do Poder Público ou de empresas revestidas do *múnus publicum*.

No que tange às normas jurídicas, é possível entender que elas já são em grande número e cobrem de modo amplo diferentes questões ambientais, mas quase sempre são de pouca efetividade por deficiências na fiscalização e, sobretudo, na educação enquanto traço cultural.

Para ilustrar a importância da efetividade que se deve dar à educação ambiental e às normas em geral, apresentam-se, por um lado, a ciclovia mostrada na Figura 1a, que está sendo implantada na Universidade de Brasília e em outros setores de Brasília, e, por outro, a ciclovia mostrada na Figura 1b, retratando a ciclovia construída na orla de Boa Viagem, na cidade de Recife. Observa-se, na Figura 1a, que o revestimento adotado é um pavimento rígido impermeabilizado em sua base por um filme plástico, e o da Figura 1b, um pavimento em princípio permeável. Esse pavimento tende a perder sua característica permeável quando é assente sobre base imprimada com produto betuminoso. Mas o interessante é que logisticamente as implicações ambientais na situação da Figura 1a devem ser consideradas no mínimo preocupantes, enquanto para a situação da Figura 1b são provavelmente irrelevantes. No primeiro caso, a ciclovia foi implantada em um solo de cerrado com elevada capacidade de infiltração

e erodível quando submetido a fluxos de água superiores aos naturais, ou seja, a impermeabilização tem impacto considerável na infiltração global da área e pode gerar problemas ambientais. Já o segundo caso se refere a uma área de orla pouco susceptível a problemas de drenagem. Neste caso, a opção pelo uso de pavimentos intertravados provavelmente se deu em função mais de aspectos paisagísticos que de infiltração, não se menosprezando aqui a importância da paisagem como elemento ambiental de grande relevância.

Ressalta-se, ainda, que a ciclovia implantada na Universidade de Brasília (UnB) encontra-se em ambiente acadêmico, onde são ensinadas disciplinas com conteúdo ambiental em diferentes cursos de graduação e pós-graduação que apontam para práticas contrárias à adotada. A UnB é a instituição que foi líder no desenvolvimento de um amplo projeto sobre erosões no Centro-Oeste e lidera o projeto que dá origem a esse livro. No *site* www.geotecnia.unb.br, estão presentes várias dissertações, teses e publicações, como cartilhas e livros, que mostram práticas ambientalmente sustentáveis. Mas tudo isso ainda é insuficiente, independentemente de quem dirige ou administra a universidade ou o órgão público responsável pela construção, porque, na realidade, o que não se consegue, por absoluta falta de políticas públicas, é transferir o conhecimento gerado para a sociedade na qual se incluem os administradores e engenheiros. O foco tem sido produzir o alimento, o saber e o conhecimento técnico-científico e juríd ico, e não os utilizar para saciar a fome, para resolver os problemas ambientais, para promover o desenvolvimento humano, para tornar efetivas as normas não por medo, mas por educação. Que fique claro que esta não é uma crítica específica à Universidade de Brasília, que apenas subsidia o texto com um exemplo, pois o problema é sistêmico, é regional, é nacional.

Figura 1. a) Ciclovia em pavimento rígido e impermeável; b) ciclovia em pavimento permeável.

3 A energia no contexto dos comportamentos hidráulico e mecânico

Voltando-se o olhar para a energia no sistema sólidos-água, torna-se possível entender os mecanismos que controlam os comportamentos hidráulico e mecânico do solo frente à infiltração.

Inicialmente, é importante reconhecer que as condições atmosféricas atuam como fator condicionante do estado do solo na superfície do maciço, proporcionando trocas de energia que se apresentam sob diferentes formas, por exemplo, na insolação, no vento, na pressão

atmosférica, sendo essa última diretamente relacionada aos efeitos térmicos da radiação solar e aos processos de aquecimento da massa de ar. Como consequência das condições atmosféricas, têm-se numerosas formas de troca de energia, como por evaporação (calor latente retirado do solo) e precipitação (aumento do estado energético da água do solo), ou mesmo trocas direta de energia calorífica, por irradiação solar, condução e convecção de calor do ar atmosférico em contato com a superfície do terreno.

Para o entendimento da influência dessas formas de energia atuando como condicionantes externas do estado do maciço (umidade, porosidade, estrutura), é necessário avaliar o elo entre uma partícula de argila e a solução eletrolítica (moléculas de água, cátions e ânions) que a hidrata (Figura 2). Para analisar esse elo, foram preparadas as Figuras 2, 3 e 4, não havendo, no entanto, preocupação com a escala nem com a real variação de energia. Trata-se apenas de esboços dos fenômenos. Cabe lembrar que, nas partículas de minerais de argila, comumente predominam cargas negativas na face e positivas nos bordos. Geralmente, para neutralizar essas energias de superfície (cargas de superfície), a partícula é hidratada por uma solução eletrolítica de água, sendo a espessura da camada de hidratação função da energia externa (temperatura, pressão), da mineralogia da partícula (caulinita, ilita, clorita, montmorilonita, etc.) e dos cátions trocáveis presentes no solo, por exemplo, sódio e cálcio.

É apresentada, na Figura 2a, a variação da hidratação de uma partícula de argila com a temperatura e, na Figura 2b, essa variação com a pressão atuante no solo. Observa-se respectivamente, nessas figuras, que a umidade da partícula diminui com aumento da temperatura e da pressão externas. Aumentando-se a energia térmica externa, ocorre desidratação da partícula como forma de restabelecer o equilíbrio de energia na interação solo-atmosfera. O mesmo ocorre com relação à pressão, que é também uma forma de energia. O fenômeno em relação à temperatura deixa claro que procedimentos como o de secagem do solo ao ar vão conduzi-lo a umidades higroscópicas que variarão, dentre outros, com a temperatura ambiente. Por sua vez, o fenômeno em relação à pressão permite que se faça um paralelo com o que ocorre na determinação da curva característica pela técnica da translação de eixos. Em ambos os casos, assim com nos demais que serão ilustrados nas Figuras 3 e 4, embora a discussão se dê aqui em nível de partícula, o entendimento pode ser ampliado para o solo como um todo. Para que o sistema entre internamente em equilíbrio, uma partícula supre sua deficiência energética em partículas vizinhas que, por sua vez, também se apresentam com potenciais deficientes de energia. Essa compensação de energia entre partículas, para que se restabeleça o equilíbrio do sistema solo-solução eletrolítica de água, estabelece entre elas uma ligação que variará na proporção da deficiência de energia. Quando o solo é umedecido, ou seja, quando se disponibiliza água, como no processo de infiltração, as partículas passam a depender menos umas das outras, enfraquecendo, assim, o elo entre elas. Esse fenômeno de natureza químico-mineralógica se soma ao oriundo da energia capilar, fenômeno de natureza físico-química, que não será aqui tratado, pois o objetivo dessas análises se volta tão somente para mostrar a importância de se considerar a energia na análise de fenômenos como os de infiltração, subsidência e ruptura de encosta, não se fazendo necessário considerar os dois fenômenos para que se estabeleça esse entendimento. Cabe apenas lembrar que a capilaridade, embora sofra uma forte influência do aspecto físico (porosidade), depende também da energia de superfície dos minerais.

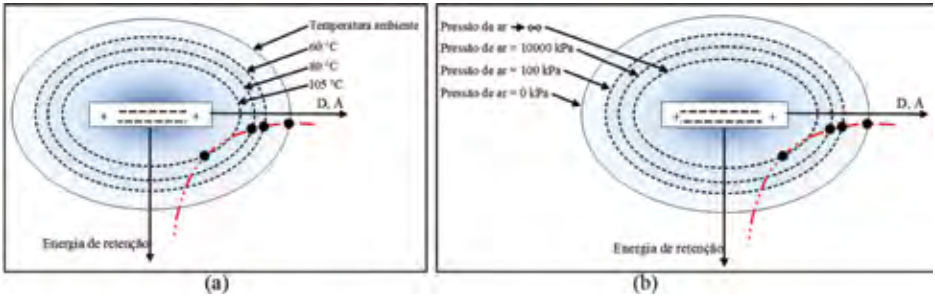


Figura 2. a) Variação da energia de retenção e da hidratação com a temperatura; b) variação da energia de retenção e da hidratação com a pressão.

Considerando-se a influência da variação da temperatura na energia de retenção de água, observa-se, na Figura 3, que tanto no caso de a) uma caulinita, como no caso de b) uma montmorilonita ou de uma outro mineral de argila qualquer, à medida que aumenta essa temperatura externa, para que ocorra o equilíbrio de energia entre os meios externo e interno, amplia-se a energia de retenção de água. O mesmo se dará em relação ao aumento de pressão. É evidente que, para uma mesma energia térmica ou mesma pressão, a umidade de hidratação da argila variará com a mineralogia do solo. As figuras apresentadas são apenas esboços feitos para explicar que o nível de hidratação do mineral e o potencial de retenção de água estão diretamente ligados e correspondem ao estado de equilíbrio da energia interna com determinada energia externa aplicada ao solo como é o caso da energia térmica e/ou da pressão. Comparando-se as partículas de argila contidas nas Figuras 3a e 3b, verifica-se que, enquanto a partícula de caulinita (a) mantém sua espessura com o aumento da temperatura, a de montmorilonita (b) tem sua espessura diminuída. O mesmo ocorre se a energia atuante que varia for a pressão. Essa característica da montmorilonita e dos demais argilominerais expansivos é importante tanto em relação ao comportamento mecânico, como em relação ao comportamento hidráulico, pois as variações de volume global registradas com a variação de energia externa não correspondem diretamente às variações de vazios do solo. Sabe-se que os comportamentos hidráulico e mecânico se relacionam com o índice de vazios e com a distribuição dos poros no solo e não diretamente com a variação de volume global, pois essa compreende as alterações de vazios e as modificações das distâncias interplanares basais dos minerais expansivos (CAMPOS *et al.*, 2008).

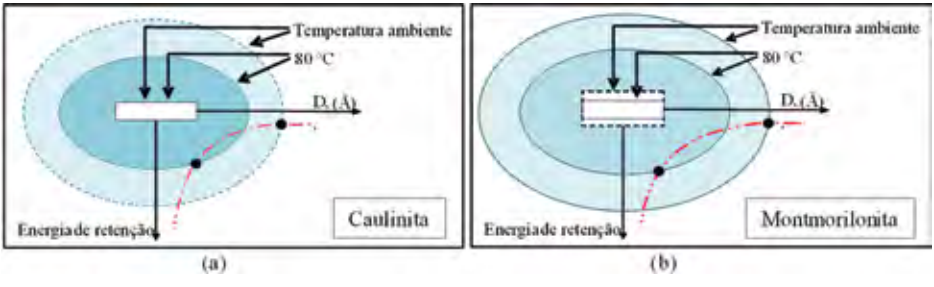


Figura 3. a) Caulinita – variação da energia de retenção e da hidratação com a temperatura; b) montmorilonita – variação da energia de retenção, da hidratação e da espessura da partícula com a temperatura.

A Figura 4a mostra que, para uma mesma energia externa, no caso a temperatura, o nível de hidratação do solo variará segundo a mineralogia. Já a Figura 4b mostra que o nível de hidratação do solo variará também com a sua química. Cabe destacar que, a menos que outras variações de energia ocorram no solo, a uma determinada energia externa corresponderá uma mesma energia de retenção independentemente da química ou mineralogia do solo, pois se trata de variação de energia interna para compensar a variação de energia externa aplicada ao solo.

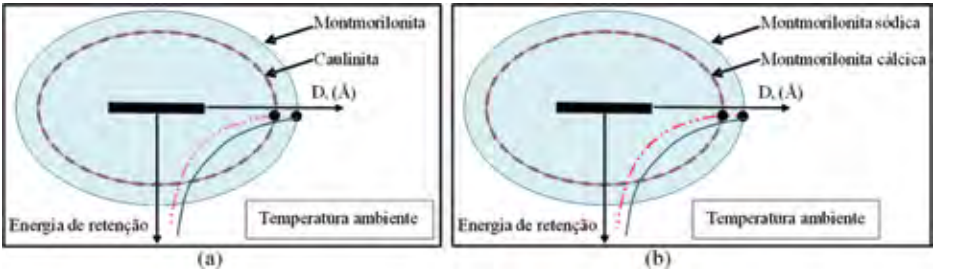


Figura 4. a) Variação da umidade higroscópica segundo o mineral; b) variação da umidade higroscópica segundo os cátions trocáveis.

Após esta breve introdução, é possível situar a energia no contexto dos comportamentos hidráulico e mecânico.

No comportamento hidráulico, a facilidade de movimentação das moléculas de água (fluxo) devido à energia gravitacional será tanto maior quanto menor o déficit de energia em cada partícula, pois, em existindo, o déficit será suprido pelas moléculas de água, cátions e ânions que se fizerem presentes. Como resultado, a água dos poros perde mobilidade, por encontrar-se atraída pelas partículas sólidas. Considerando-se, porém, a movimentação das moléculas de água devido ao déficit de energia interna, esta será tanto maior quanto maior o déficit, podendo evidentemente ocorrer restrições a tais movimentos, como é o caso do surgimento de bolhas oclusas ou de uma frente gasosa. Em síntese, considerando-se a questão do equilíbrio de energia, pode-se entender, por um lado, que a infiltração será tanto maior quanto maior a porosidade do solo e maior a carga hidráulica gravitacional; por outro lado, a infiltração será tanto mais importante quanto maior o déficit de energia interna. No primeiro caso, sendo elevada a porosidade, as moléculas de água à medida que se afastam das partículas estarão menos sujeitas a suas energias de retenção de água, e quanto mais elevada a energia gravitacional com maior intensidade ocorrerá o desequilíbrio de energia favorável ao fluxo, ampliando a taxa de infiltração. Já no segundo caso, sendo elevado o déficit de energia interna, a partícula buscará supri-lo de modo mais intenso, ampliando a taxa de infiltração.

Quando se avalia o problema do fluxo no contexto da energia, é necessário levar em conta as características do fluido, tais como a temperatura e a composição química, pois são, na realidade, componentes de energia.

No campo do comportamento mecânico, essas interações entre partículas, seja de natureza químico-mineralógica (forças de adsorção), seja de natureza físico-química (forças capilares), projetam-se como tensões interpartículas, intervindo diretamente em parâmetros como resistência (coesão e atrito), deformabilidade, colapso e expansão. Portanto, a infiltração de águas pluviais deve passar por avaliações do comportamento mecânico do solo frente às variações de umidade a que ele se sujeitará.

Quando se avalia a importância para o processo de infiltração de aspectos como forma do relevo, forma dos sistemas de infiltração, perfil de intemperismo e umidade e porosidade do solo, a reflexão deve voltar-se para a análise dos problemas no campo da energia. Essa análise deve, em um primeiro momento, dar-se no campo do entendimento dos fenômenos e mecanismos para, em uma segunda etapa, recorrer-se a experimentos e cálculos que permitam tratar dos fenômenos do modo mais próximo da realidade possível.

Exemplificando, sabe-se que a infiltração de águas pluviais em um solo poroso profundamente intemperizado poderá, devido às alterações de energias internas de interação entre partículas, provocar o fenômeno do colapso. Esse é o entendimento inicial geral que merece ser detalhado considerando-se o tipo de solo. Os solos porosos profundamente intemperizados, quando argilosos, são formados por agregados de argila e/ou argila e silte, o que exige a consideração da energia em dois universos: o dos microporos que compõem os agregados (energia predominantemente de natureza químico-mineralógica), e o dos macroporos existentes entre esses agregados (energia de natureza químico-mineralógica e/ou físico-química). As variações de energia internas ao agregado, interpartículas de argila e/ou de argila e silte interferem na estabilidade e deformabilidade dos agregados, mas pouco sobre a estabilidade da macroestrutura do solo, ou seja, sobre a interação entre agregados. Para essa estabilidade, são relevantes as interações entre agregados e as energias atuantes entre eles.

Esse exemplo mostra que a busca do entendimento dos fenômenos oriundos da infiltração situando-os no contexto da energia poderá facilitar em estudos, projeto e execução de sistemas de infiltração.

4 O clima e a interação solo-atmosfera

Ao estudar, projetar e executar sistemas de infiltração, é necessário levar em conta o clima e a interação solo-atmosfera. No clima, são relevantes aspectos como temperatura, umidade relativa, radiação solar e intensidade e distribuição das precipitações pluviométricas. Já a interação solo-atmosfera é mais complexa e envolve aspectos como tipo de solo, direção do vento e do sol, altitude, forma do relevo, cobertura, ocupação e uso do solo.

É necessário considerar, principalmente junto às áreas urbanas, a dinâmica do clima em função das ações antrópicas, pois estas têm o potencial de modificar não apenas características como temperatura, umidade relativa e regime de precipitação, mas também as propriedades químicas da água da chuva, sendo esse um elemento a ser introduzido nos programas de monitoramento do clima. No Brasil, mesmo que indiretamente, incentiva-se o transporte individual ao facilitar a aquisição de automóveis. A massificação do transporte individual termina por impactar características climáticas, como temperatura e composição química das águas pluviais, as quais, por sua vez, ao infiltrarem no maciço, podem afetar a estabilidade estrutural do solo, em especial dos solos tropicais profundamente intemperizados.

A interação solo-atmosfera, ao interferir na umidade e nas características estruturais dos solos de superfície e, assim, na própria capilaridade ou sucção que neles atua, acaba afetando a capacidade de infiltração dos maciços, conforme mostrado por Luiz (2012). Tal interação contribui ainda para um processo de intemperização relativamente rápido do maciço, conforme se depreende dos estudos realizados por Lima (2003).

Cabe ainda destacar que a própria impermeabilização do solo termina por alterar o clima, interferindo diretamente na interação solo-atmosfera nas áreas expostas. Isso pode ser constatado pela elevação das temperaturas médias em centros urbanos, a qual, em grande parte, é causada pela ampliação das superfícies impermeáveis. Essas superfícies, ao serem impermeabilizadas, deixam de ser fontes de evaporação e consequente remoção de energia calorífica. Esse é apenas um dos vários mecanismos de troca de calor que são afetados e que resultam na alteração do microclima em ambientes urbanos.

5 Forma do relevo e cobertura do solo

Cabe inicialmente reconhecer que a forma do relevo é geralmente muito menos antropizada que a cobertura do solo. No entanto, ambas têm grande relevância para o processo de infiltração e problemas socioambientais como as rupturas de encosta e as inundações.

A forma do relevo é pouco considerada enquanto elemento interveniente no fluxo, uma vez que geralmente se trabalha usando sistemas bidimensionais de análise. No entanto, ela deve assumir maior grau de importância nas análises geotécnicas de problemas como erosões, inundações e rupturas de encosta. Santos (2007), ao analisar a ruptura de um corte para implantação de uma galeria de águas pluviais, evidenciou tal importância.

A implantação de sistemas de infiltração de águas pluviais compensatórios deve, portanto, levar em consideração a forma do relevo e suas implicações na estabilidade do maciço. Embora as análises realizadas por Santos (2007) tenham se restringido à análise estática no tempo ao considerarem tão somente as variações de sucção e do nível do lençol freático, é necessário incorporar nas análises a avaliação da possibilidade de degradação do maciço, em especial a física, que pode se dar em período de tempo relativamente curto. Em áreas rurais, torna-se ainda indispensável avaliar a solubilização e carreamento de compostos químicos utilizados na prática agropecuária, que são susceptíveis de instabilizarem estruturalmente os solos. Esse é um aspecto que, embora quase nunca considerado, certamente influencia, em muitos casos, a estabilidade das encostas e a infiltração das águas pluviais nos maciços.

Quanto à infiltração das águas servidas, apesar de sempre indesejáveis, muitas vezes ela faz-se necessária por absoluta falta de infraestrutura. Em função da química do fluido e das condições mais ou menos favoráveis ao fluxo, devem ser analisadas, além da possibilidade de degradação física, a degradação químico-mineralógica.

A influência da cobertura do solo sobre a capacidade de infiltração do maciço varia entre dois extremos: o mais favorável, em que se preserva a cobertura natural, e aquele correspondente à impermeabilização total da superfície do solo. Para viabilizar o desenvolvimento sustentável, é necessário maior ênfase à educação ambiental, às normas e aos regulamentos que imponham maior disciplina na ocupação e uso do solo.

6 A importância da qualidade da água

Ao se implantarem sistemas de infiltração compensatória, é necessário atentar para a origem e qualidade das águas pluviais que serão infiltradas. Independentemente da qualidade

da água precipitada, a água proveniente da cobertura de um edifício não apresenta geralmente as mesmas características da água proveniente de um pavimento. Também têm suas propriedades, geralmente, muito alteradas as águas pluviais, que, após precipitação, percolam por áreas submetidas a práticas agropecuárias ricas em insumos agrícolas, pesticidas e herbicidas.

A água da chuva propriamente dita apresenta propriedades químicas e de temperatura relacionadas com as condições ambientais que predominam na região e igualmente podem exercer grande influência sobre a infiltrabilidade e a estabilidade estrutural do solo.

Devido aos riscos de contaminação do solo e da água de subsuperfície, é importante monitorar a qualidade da água da chuva e adotar medidas mitigadoras de eventuais impactos ambientais negativos. Destaca-se, ainda, que a qualidade da água da chuva pode interferir no próprio fluxo e na estabilidade e degradação estrutural do solo.

A infiltração de águas servidas deve ampliar as preocupações ambientais e técnicas, pois, além de comprometer a qualidade das águas de subsuperfície e o próprio solo, ainda afeta o comportamento mecânico do maciço, podendo ser responsável, em muitos casos, por subsidências e rupturas de encosta.

7 A importância do perfil de intemperismo

As propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos tropicais estão diretamente ligadas, dentre outros, ao nível de intemperismo por eles sofrido. Quanto à infiltração, o papel do perfil de intemperismos deve ser visto sob dois prismas, quais sejam: o da infiltração propriamente dita e o dos reflexos na infiltração no comportamento hidráulico e mecânico do solo.

Considerando-se a infiltração propriamente dita, tem-se geralmente que, quanto mais intemperizado for o solo, maior é o seu grau de agregação e, portanto, maiores a macroporosidade e a infiltrabilidade. Os solos profundamente intemperizados correspondem à camada mais superficial, que pode, porém, atingir vários metros de espessura. Esses solos são bem drenados e apresentam elevada infiltrabilidade. Em seguida, tem-se, no perfil de intemperismo, a transição entre o solo profundamente intemperizado e o solo saprolítico. Essa camada, comumente, não é muito espessa e apresenta, por ser de transição, grande heterogeneidade em suas propriedades e em seu comportamento, conforme mostra Cardoso (2002). Logo, os resultados de ensaios de infiltração e permeabilidade nessa camada de solo dada sua característica de grande heterogeneidade, requerem, maior cuidado ao se definir um comportamento como padrão. Já a camada subjacente a essa, a de solo saprolítico, é geralmente marcada por baixa permeabilidade e infiltrabilidade. Esse comportamento será mais ou menos marcante segundo a rocha de origem e suas características estruturais. Como o nível d'água encontra-se geralmente no contato com essa camada e sua permeabilidade é comumente pequena, não é frequente serem nela instalados os sistemas de infiltração, lembrando que a recarga direta do aquífero pode gerar problemas de contaminação.

Indo agora para o campo dos reflexos da infiltração no comportamento do solo, tem-se que, no manto profundamente intemperizado, ocorrem riscos de colapso estrutural do solo, o que pode ocasionar subsidências e perda de capacidade de carga. Na camada de transição, dada sua heterogeneidade de propriedades e comportamento, a influência apresentará grande variabilidade, podendo ir de porções marcadas por colapso estrutural e outras por mecanis-

mos de expansão. Já a infiltração no solo saprolítico pode contribuir tanto para a sua perda de capacidade de carga, como para a ocorrência de expansão mineralógica e/ou estrutural. Essa expansão dependerá evidentemente da presença de argilominerais expansivos e/ou de uma estrutura herdada favorável à expansão estrutural.

Para ilustrar a importância do intemperismo na macroposidade do solo e, portanto, em sua infiltrabilidade, a Figura 5 (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2002) mostra a relação entre o somatório dos teores de gibsita, hematita e goetita e o índice de vazios interagregado que caracteriza um perfil de solo de 10 m de espessura. Até 7 m é considerado profundamente intemperizado, de 7 m a 8 m tem-se a transição e, a partir dessa camada, inicia-se o solo saprolítico. Nessa figura, os dois pontos destoantes da tendência correspondem às profundidades de 1 m e 2 m, marcadas pela presença de matéria orgânica, que é, como se sabe, agregadora.

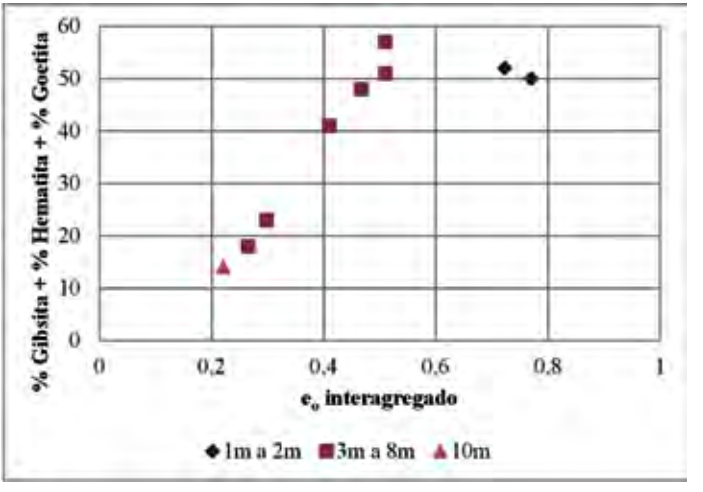


Figura 5. Influência do intemperismo no índice de vazios interagregado (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2002)

Em síntese, ao se estudar, projetar ou executar sistemas de infiltração compensatórios em perfis de intemperismo é recomendável avaliar o estágio de evolução intempérica do solo e com base nele a infiltrabilidade e os reflexos da infiltração no comportamento hidráulico e mecânico do maciço.

8 A infiltração frente ao estado não saturado do solo e algumas de suas consequências

Devido ao risco de contaminação do lençol freático e à necessidade de certa capacidade de armazenamento, os sistemas de infiltração compensatórios são geralmente implantados acima do nível d'água freático, ou seja, em solos não saturados.

Por um lado, a condição não saturada do solo interfere na capacidade de infiltração e, por outro, ao infiltrar, a água afeta o seu comportamento hidráulico e mecânico, disso podendo advir alguns problemas de cunho geotécnico.

Do ponto de vista da infiltração, a capilaridade e/ou sucção existentes nos solos não saturados atuam como gradiente de energia, somando o seu efeito à carga hidráulica de natureza gravimétrica correspondente à altura da lâmina d'água, o que favorece, em um primeiro momento, a infiltração. No entanto, a oclusão da fase ar, em um segundo momento, quando esta é contínua, atua como barreira à infiltração; quando descontínua, provoca a redução da permeabilidade do solo, afetando igualmente a infiltrabilidade. A fase ar sob pressão positiva pode conduzir à desestruturação do solo, propiciando a ocorrência de instabilizações e erosões.

Quanto ao comportamento mecânico, o aumento do grau de saturação do solo pode provocar o mecanismo do colapso estrutural nos solos profundamente intemperizados e a expansão estrutural ou mineralógica nos solos pouco intemperizados. Em ambos os tipos de solo, assim como nos solos de transição, o aumento da umidade do maciço gerado pela infiltração provoca a redução da resistência e o aumento da deformabilidade dos solos.

9 Considerações sobre a forma geométrica dos sistemas de infiltração

A geometria dos sistemas de infiltração pode ser imposta ou sofrer limitações oriundas de fatores como tipo e perfil de solo, nível d'água freático, regime de precipitações pluviométricas, área disponível para ser feita a infiltração, condicionantes de obra e projeto, condições de execução, matérias de construção disponíveis e normas que disciplinam a ocupação e o uso do solo. Entretanto, muitas vezes ela simplesmente constitui-se em opção do projetista.

A infiltrabilidade da água no solo é quase sempre condicionada pela geometria do sistema de infiltração, devendo o projetista atentar para certas peculiaridades, como volume de água a ser infiltrado, objetivo da infiltração e riscos que a infiltração oferece.

Para exemplificar a importância da finalidade da infiltração, podem-se considerar dois casos bem distintos: o da infiltração das águas pluviais através de um pavimento permeável e o da infiltração das águas pluviais provenientes de uma cobertura residencial com pouco terreno disponível para a implantação do sistema de infiltração. No primeiro caso, dispõe-se de área de infiltração semelhante à da ocorrência da ocupação e, com isso, geralmente privilegia-se o fluxo vertical, devendo a água infiltrada ter seu excedente armazenado para infiltração progressiva. Deve-se, nesse caso, avaliar como é afetada a capacidade de suporte do solo em função do seu aumento da umidade. Já no segundo caso, dispondo-se de pouco espaço para implantação do sistema de infiltração, geralmente opta-se pela implantação de poços ou trincheiras de pequenas dimensões. No caso dos poços, geralmente privilegia-se pela maior área a infiltração horizontal e, no caso das trincheiras, pode-se buscar certo equilíbrio, ou buscar que a área de infiltração horizontal não seja, na média, tão superior à vertical. Portanto, a geometria do sistema foi condicionada pelo projeto e pela pouca disponibilidade de espaço. É preciso que se avaliem, nesse caso, dependendo do tipo de solo e da geologia local, aspectos como risco de erosão interna e perda de capacidade de carga do solo suporte das fundações. Destaca-se que, ao se optar por qualquer dessas geometrias, a capacidade de infiltração desses sistemas dependerá da anisotropia de permeabilidade do solo e da própria geometria do sistema.

No processo de infiltração, a forma geométrica dos sistemas de infiltração pode ser a mesma. No entanto, ainda assim, há que se levarem em conta certas peculiaridades relacionadas à anisotropia do solo e às dimensões do sistema. Para exemplificar essa importância, a Figura 6 apresenta a variação comprimento do círculo entre a área de infiltração lateral na parede de um poço cilíndrico e aquela considerando-se 1 cm de penetração da água no maciço. Verifica-se que a variação do comprimento do círculo e, portanto, da área de infiltração é tanto maior quanto menor o diâmetro do poço. Maior essa variação maior será a queda na energia resistente ao fluxo da água no processo de infiltração, ou seja, por um lado poços de menor diâmetro tendem a ser mais eficientes e, por outro, ensaios realizados em furos de pequeno diâmetro maximizam a capacidade de infiltração e vão contra a segurança no dimensionamento dos sistemas de infiltração. Esse exemplo serve apenas para mostrar a necessidade de se levar em conta a geometria dos sistemas de infiltração compensatórios, conforme indicado por Silva (2012). Ela observou que a infiltração junto à parede de menor largura em uma trincheira retangular era distinta daquela que se verificava junto à parede de maior largura.

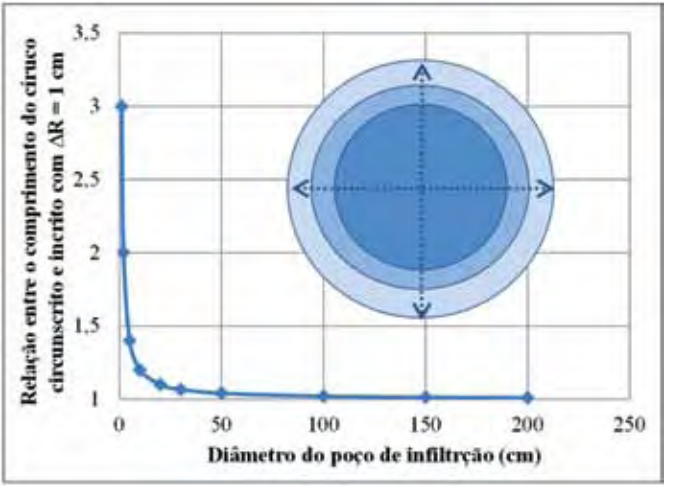


Figura 6. Variação da área lateral de infiltração em função do diâmetro do poço.

Leão Carvalho (2008), ao estudar poços de infiltração com diferentes diâmetros e mesma profundidade em um mesmo local na cidade de Goiânia, constatou experimentalmente que a taxa de infiltração diminui com o aumento do diâmetro do poço (Figura 7), o que corrobora a análise feita a partir da Figura 6.

Esse exemplo aponta ainda para a necessidade de se efetuar correção na taxa de infiltração quando esta é determinada *in situ* em furos de menor diâmetro que o adotado para os poços de infiltração. Em se tratando de trincheiras, ainda há que se levar em conta o efeito da maior dissipação de energia junto aos seus cantos ao longo da trajetória de infiltração, o que proporciona diferença entre os lados maiores e menores do sistema de infiltração no avanço das frentes de umedecimento ou saturação. Fica, portanto, clara a relevância da orientação da trincheira em relação às obras existentes e sensíveis às variações espaciais de umidade do solo suporte.

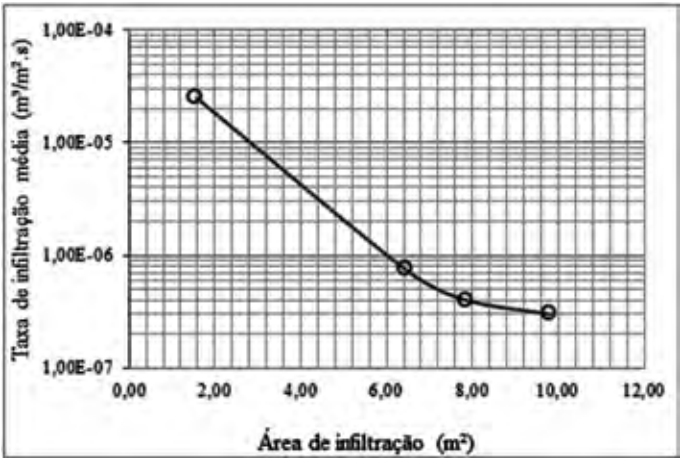


Figura 7. Relação entre a taxa de infiltração *versus* área de infiltração das estruturas de infiltração estudadas (LEÃO CARVALHO, 2008).

Assim como é importante a forma do sistema de infiltração para o seu desempenho, também o é o tipo de solo. Estudos realizados por Leão Carvalho (2008), considerando-se a mesma forma e dimensões de poços, porém variando-se o local de ensaio, ou seja, o tipo de solo e a permeabilidade do maciço (Figura 8), apontam para a necessidade de se realizarem ensaios prévios para subsidiar o dimensionamento dos sistemas de infiltração. Essa figura mostra que, em solos com taxas de infiltração inferiores a 10^{-6} $m^3/m^2.s$, os sistemas de infiltração são pouco eficientes e requerem volumes de acumulação muito grandes para atuarem como armazenamento. Destaca-se ainda, com base nesses resultados muito distintos para solos de uma mesma cidade, que práticas voltadas para a utilização de parâmetros gerais da literatura devem ser evitadas.

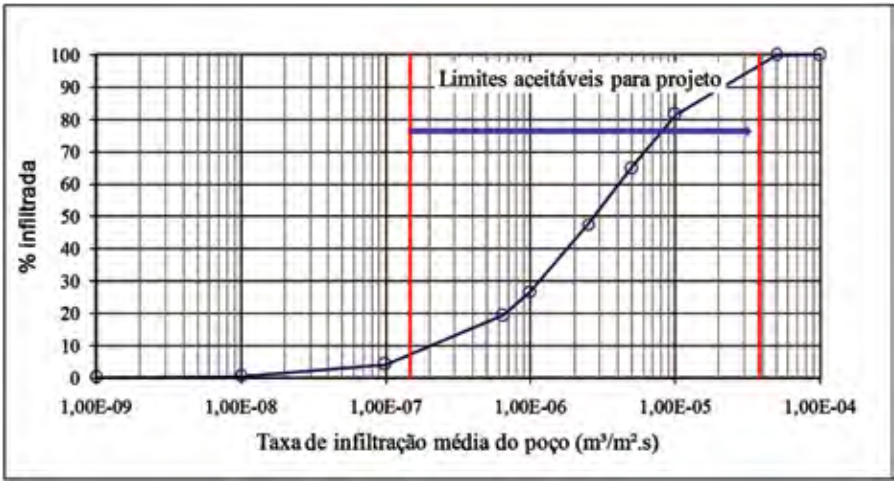


Figura 8. Percentual do volume infiltrado para mesmo poço em diferentes tipos de solo (LEÃO CARVALHO, 2008).

10 Riscos inerentes à infiltração

A necessidade de implantação de sistemas de drenagem surge com a impermeabilização da superfície do solo e/ou com a alteração das condições de fluxo superficial. Existem duas alternativas de drenagem do excesso de água que passa a fluir superficialmente: a implantação dos sistemas de drenagem convencionais, as redes de drenagem e a implantação de sistemas de drenagem compensatórios. No primeiro caso, busca-se evacuar da área impermeabilizada o excesso do fluxo superficial oriundo das precipitações pluviométricas. Esses sistemas, embora resolvam localmente o problema quando os ocupantes e usuários do solo respeitam os coeficientes de ocupação definidos nas normas edilícias, o que nem sempre é o caso, acabam gerando problemas a jusante como erosões de margem dos cursos d'água e dos reservatórios e inundações. No segundo caso, o dos sistemas de infiltração compensatórios, busca-se resolver localmente o problema do excesso de água precipitado e não infiltrado. Esses sistemas de infiltração, além de reduzirem os gastos públicos com sistemas de drenagem convencionais, oferecem vantagens como a da recarga dos aquíferos, a da mitigação ou mesmo eliminação de problemas como os de erosão e inundação. No entanto, eles também podem oferecer riscos ambientais e geotécnicos.

Como principais riscos da infiltração das águas pluviais por meio dos sistemas de drenagem compensatórios, como as bacias de retenção, as valas de drenagem, os tapetes drenantes e as trincheiras e os poços, encontram-se: o risco de contaminação do solo e do lençol freático; o risco de colapso estrutural ou expansão mineralógica ou estrutural do solo impactando nas obras existentes ou que estão sendo implantadas; o risco de erosão interna; o risco de esqueletização do maciço; o risco de subsidências e rupturas de encostas em consequência da perda de resistência do solo provocada pelo aumento de umidade ou mesmo devido a ascensões do nível d'água freático.

Sempre que se vai implantar um sistema de drenagem compensatório, é necessário, portanto, avaliarem-se os impactos ambientais e geotécnicos da solução proposta e a possibilidade de os riscos indicados, dentre outros, concretizarem-se. Em função do grau desses riscos, deve-se agir preventivamente de modo a evitá-los ou mitigá-los. Desconhecendo-os por algum motivo, deve-se, por precaução, evitar a construção dos sistemas de infiltração compensatórios, ou seja, embora socioambientalmente de grande relevância, a sua implantação requer estudos consistentes de avaliação dos riscos ambientais e geotécnicos.

11 Alguns dos estudos de maior relevância

Antes da implantação de qualquer sistema de drenagem de águas pluviais, deve-se avaliar o volume de água a ser drenado, considerando-se um determinado período de recorrência a ser definido e levando-se em conta os riscos socioambientais e técnicos presentes. Deve-se ainda analisar a origem, a qualidade e as características da água a ser infiltrada e as técnicas e materiais de construção disponíveis para utilização. Esses são alguns dos condicionantes externos a serem analisados.

Internamente, tem-se, por um lado, a necessidade de avaliação da capacidade de infiltração do maciço, o que pode ser feito por meio de ensaios de laboratório, ensaios de per-

meabilidade, de campo e de infiltração. A definição dessa capacidade a partir de correlações com índices físicos é, para os perfis de solos tropicais, quase sempre deficiente, devendo ser evitada.

Deve-se ainda avaliar internamente, dentre outros, os riscos que a infiltração oferece à estabilidade estrutural do solo, à perda da capacidade de suporte das fundações, à ocorrência de erosão interna e de processos de esqueletização do maciço. São ensaios gerais recomendados para esses casos: os ensaios de caracterização do solo que avaliam se a matriz grossa é filtro da fina; o ensaio duplo oedométrico; os ensaios do furo de agulha ou *pinhole test* com ciclo completo de aumento e diminuição da carga hidráulica. Outros ensaios específicos podem ser necessários como a definição de curvas características e ensaios para avaliação influência do aumento da umidade na resistência ao cisalhamento do solo.

12 Considerações finais

Apesar da grande relevância socioambiental e técnica dos sistemas de infiltração compensatórios, este capítulo aponta em direção à inviabilização de seus usos, ou usos sem avaliações de eficiência e riscos, caso não ocorra uma distribuição de atribuições entre a administração pública e a iniciativa privada. Nessa distribuição, os aspectos gerais devem ser atribuição da administração pública, e os específicos da iniciativa privada ou mesmo de instituições e empresas públicas quando forem elas as responsáveis pelo empreendimento.

Entre os aspectos gerais, situam-se, por exemplo: a definição do período de recorrência a ser considerado segundo a área a ser ocupada; a delimitação das áreas segundo os diferentes riscos mais gerais (infiltrar água em uma encosta oferece nível de risco bem distinto daquele oriundo da infiltração em área de planície); avaliação periódica da qualidade da água da chuva que se precipita levando-se em conta aspectos relativos às caraterísticas químicas como o pH e os hidrocarbonetos. Observa-se desses exemplos que, enquanto alguns aspectos como os relativos aos riscos gerais já devem ser analisados quando da elaboração do plano diretor, outros como a avaliação das características das águas pluviais precipitadas necessitam de monitoramento continuado. Destaca-se, ainda, que, como os recursos públicos são provenientes de tributos e taxas recolhidas pela iniciativa privada e pela sociedade em geral, a administração pública, ao assumir os estudos e a gestão dos aspectos gerais, não só permite racionalizar o uso desses recursos como também desonera e otimiza os esforços e o tempo dispendidos pela iniciativa privada ao disponibilizar as informações e condicionantes gerais.

Entre os aspectos específicos a serem analisados pela iniciativa privada, estão a capacidade de infiltração do maciço e os riscos locais e para os empreendimentos vizinhos. Dentre esses riscos citam-se a título de exemplo: os riscos de colapso estrutural e expansão do solo e os riscos de erosão interna e esqueletização do maciço.

Viu-se ao longo deste livro que o uso de sistemas de infiltração compensatórios tem grande relevância socioambiental, mas, para que se torne viável o seu uso e minimizem-se os riscos oriundos de suas implantações, é necessário: ampliar a educação ambiental enquanto formadora de um traço cultural; estabelecer normas técnicas, administrativas e jurídicas apropriadas e assegurar-lhes efetividade; definir os aspectos gerais e os específicos a serem analisados segundo a área a ser ocupada e o seu uso, constituindo-se os gerais em atribuições

da Administração Pública e os específicos da iniciativa privada ou das instituições e empresas públicas responsáveis pelo empreendimento.

Em síntese, como analisado ao longo deste livro, a infiltração das águas pluviais deve ser vista como uma alternativa, em muitos casos, técnica e economicamente viável e favorável ao desenvolvimento sustentável e à preservação dos recursos hídricos existentes com qualidade. Para isso, não importa o clima nem a estação do ano. Sempre existe, conforme ilustra a Figura 9, um elo entre a vida no planeta e a água (CAMAPUM DE CARVALHO, 2000).

Figura 9. Vitral: Quatro estações (CAMAPUM DE CARVALHO, 2000).

Referências bibliográficas

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2000). Quatro estações. 1 original de arte, vidro, 47 cm x 62 cm. Coleção particular.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GONZÁLEZ, Y. V.; SANTOS, M. A. A.; GITIRANA JR, G. F. N. (2007). Estabilidad de un talud cóncavo considerando condiciones en 3D. *In*: CONFERENCIA PANAMERICANA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA, 13, 16 a 20 de julho de 2007, Isla de Margarita. Isla Margarita: Editora ISSMGE. p. 988-993.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PEREIRA, J. H. F.; GUIMARÃES, R. C. (2002). Effondrement des sols tropicaux. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3, 10 a 13 de março, Recife, PE. Recife: A. A. Balkema Publishers, v. 2, p. 851-856.

CAMPOS, I. C. O.; GUIMARÃES, E. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 14, 23 a 26 agosto. 2008, Búzios, RJ. Búzios, RJ: ABMS. p. 1535-1542.

CARDOSO, F. B. F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Brasília, DF: UnB. 357 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.G.TD-009A/02.

LEÃO CARVALHO, E. T. (2008). Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na zona norte da cidade de Goiânia. Goiânia, GO: UFG. 229 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO.

LIMA, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília, DF: UnB. 336 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD-017A/03.

LUIZ, G. C. (2012). Relação solo/atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – Município de Goiânia/GO. Brasília: UnB. 300 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TD – 075A/2012.

SANTOS, M. A. A. (2007). Influência das condições tridimensionais de tensão e fluxo na estabilidade de um talude em solo Não Saturado. Brasília: UnB. 204 fl. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. G.TM – 152/2007.

SILVA, J. P. (2012). Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos. Brasília: Brasília, DF: UnB, 211 fl. Tese (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.G.TD-074A/12.

Fotografias utilizadas na composição da capa deste livro

Ipê Amarelo
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 14/08/2011.

Madona, Bico de Pena de Alberto Crispim Gonçalves, 1983.
Fotografia de Gilson da Silva Menezes, 27/06/2012.

Alagamento, rua Major Manoel Corrêa, bairro São Francisco, Boa Vista, RO.
Fotografia de Cláudia Marcia Coutinho Gurjão, 23/06/2006.

Erosão, Planaltina, GO.
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 12/01/2011.

Pôr do Sol, GO-225, Pirenópolis, GO.
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 13/05/2011, 18h53min.

Nascer do Sol, SHIS QI 27, Brasília, DF.
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 16/06/2012, 07h50min.

Bacia de retenção, BR-060, Km 24, Alexânia, GO.
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 05/01/2011.

Cachoeira no Município de Pirenópolis, GO.
Fotografia de José Camapum de Carvalho, 12/07/2011.